



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Analisi, Rappresentazione e Pianificazione delle risorse territoriali, urbane e storiche-architettoniche e artistiche.

Indirizzo Storia e Rappresentazione dell'Architettura e della Città.

Dipartimento di Architettura.

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/17.

MODELLI INTEROPERABILI PER IL *CULTURAL HERITAGE* *RECORDING*.

Le cupole a torrini di Sicilia e Castiglia



IL DOTTORE
TOMMASO ABBATE

IL COORDINATORE
PROF. FRANCESCO LO PICCOLO

IL TUTOR
PROF. FABRIZIO AGNELLO

CICLO XXV
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2016



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Analisi, Rappresentazione e Pianificazione delle risorse territoriali, urbane e storiche-architettoniche e artistiche.

Indirizzo Storia e Rappresentazione dell'Architettura e della Città.

Dipartimento di Architettura.

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/17.

MODELLI INTEROPERABILI PER IL *CULTURAL HERITAGE* *RECORDING*.

Le cupole a torrini di Sicilia e Castiglia

IL DOTTORE
TOMMASO ABBATE

IL COORDINATORE
PROF. FRANCESCO LO PICCOLO

IL TUTOR
PROF. FABRIZIO AGNELLO

CICLO XXV
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2016

Quando si giunge al termine di un percorso,

arriva sempre un momento per fare dei bilanci, un momento per fermarsi a salutare qualcuno, o per ripensare a quanto si è fatto e a quanto altro si sarebbe potuto fare; durante questi anni di Dottorato, mi sono sempre ritenuto fortunato ad aver conosciuto molte persone, che ancor prima di essere eccellenti studiosi, sono stati per me compagni di viaggio. Molto devo a tutti loro per ciò che ho avuto modo di fare in questi anni, e per questo motivo, adesso che sono giunto al termine di questo percorso, penso sia arrivato il momento di dire grazie.

Voglio iniziare ringraziando il professore Fabrizio Agnello, che ha rappresentato per me una fonte inesauribile di ispirazione nella ricerca e un faro nei momenti di tempesta; gli sono grato per avermi trasmesso la passione per la scoperta e avermi posto in contatto con il mondo della Ricerca; il suo entusiasmo è stato per me d'esempio in molti momenti, e spero lo sia sempre in futuro.

Un ringraziamento affettuoso rivolgo alla professoressa Ana Castro Santamaría, che mi ha accolto calorosamente nel suo Dipartimento durante il periodo di permanenza all'estero, e mi ha reso partecipe delle sue indagini trasmettendomi la sua profonda passione per l'arte; esprimo a lei la mia gratitudine per essersi spesa appassionatamente per questa ricerca.

Vorrei ringraziare il professore Stefano Piazza e il professore Salvatore Benfratello, per il prezioso supporto offerto a questo lavoro nell'inquadramento dei temi storici e nella parte conclusiva dell'indagine, e in generale per la genuinità con cui hanno fornito la propria esperienza; un ringraziamento particolare è rivolto alla professoressa Lidia La Mendola, per aver creduto negli obiettivi di questa ricerca e aver contribuito in poco tempo al loro conseguimento. Alla dottoressa Alessia Monaco va altresì la mia gratitudine, per aver messo a disposizione le sue competenze nello sviluppo delle analisi statiche condotte in questa tesi; so che non è stato semplice, e che non lo dimenticherò.

Vorrei ringraziare il professore Marco Nobile, che ha coordinato questo Dottorato come pochi avrebbero saputo fare, e che ha sempre offerto inarrivabili spunti di riflessione a tutti noi; e in generale ringrazio gli studiosi delle discipline storiche e della rappresentazione, Fabrizio Avella, Cinzia Garofalo, la Professoressa Sofia Di Fede, la professoressa Paola Barbera, Maurizio Vesco, Emanuela Garofalo, Domenica Sutera, Giuseppe Antista, Armando Antista e tutti coloro che hanno sempre offerto solidi conforti alle nostre indagini.

Ringrazio anche i miei compagni del laboratorio di Computer Grafica, Mirco Cannella e Federico Giammusso, con i quali ho condiviso moltissimo e che proprio per questo non hanno bisogno di sapere il perché di questo grazie; spero di essere per voi quello che siete stati per me in questi anni.

Un ringraziamento doveroso oltre che sentito va a tutti coloro che hanno preso a cuore questa indagine, come l'architetto Angel Casaseca Beneitez, che ringrazio per la sua immensa disponibilità nel fornire gli elaborati di rilievo di alcune fabbriche, Mons. Antonino Adragna, per aver permesso i rilievi nella cattedrale di Trapani e il personale dell'archivio di Casa Professa a Palermo. Infine vorrei concludere esprimendo il mio profondo apprezzamento per tutti coloro che lavorano nel silenzio per facilitare le nostre ricerche; un grazie particolare va alla dottoressa Maria Grazia Taormina della biblioteca del Dipartimento di Architettura, al

dottor Mario Mastroluca, a tutto il personale delle biblioteche del Dipartimento, alla splendida signora Mara e al buon Umberto.

E adesso, forse un po' più in disparte, vorrei ringraziare molte altre persone, che con la loro presenza e i loro gesti mi hanno supportato e sopportato in questi anni. Un ringraziamento particolare lo rivolgo all'ingegnere Pietro Cilluffo, che pur in un mondo professionale frenetico, riconosce ancora il valore di una chiacchierata sull'architettura; grazie per aver supportato questi miei studi e aver condiviso con me l'entusiasmo per la ricerca. Vorrei ringraziare anche Mauro Ferro, per la freschezza con la quale ha voluto contribuire alla fase di test sui modelli. Un pensiero va poi ai miei colleghi di sempre, Alessandro, Filippo e Tiziana, che in questi anni hanno condiviso con me oneri e onori di giovani architetti.

Infine, pur sapendo che un solo ringraziamento non basterà a ripagare quanto fatto per me dalle persone che amo, desidero ringraziare la mia accogliente e a volte rumorosa famiglia, i miei due fratelli, con i quali ho condiviso tutto, i miei splendidi genitori, che mi hanno portato a essere quello che sono, la mia incantevole Manu, mia zia Anna e le mie due sorelle Giusy e Stefania.

a Tommaso, Matteo, Grazia e Giovanna
tanto lontani ma sempre così vicini

SOMMARIO

INTRODUZIONE

DAL RILIEVO ALLA RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA: QUESTIONI METODOLOGICHE	1
capitolo 1 _ Misurare/conoscere/ricostruire.....	3
1.1 misurare/conoscere/.....	3
1.2 .../conoscere/ricostruire	6
1.3 Modelli: mimesi e interpretazione	7
capitolo 2 _ <i>Cultural Heritage Recording</i>: metodi integrati per la documentazione dei beni culturali..	15
2.1 La registrazione del patrimonio culturale	15
2.2 Classificazione dei metodi <i>no-contact</i>	16
2.3 Metodi e strumenti <i>range-based</i>	17
2.3.1 Scanner triangolatori	19
2.3.2 Scanner distanziometrici	21
2.3.3 Pre-processing dei dati laser scanning	22
2.4 Metodi e strumenti <i>image-based</i>	25
2.4.1 La fotogrammetria: cenni storici	26
2.4.2 Principi di fotogrammetria	28
2.4.3 La fotomodellazione	31
2.4.4 Dense Stereo Matching (DSM) e Structure from Motion (SfM)	33
2.5 Verso una <i>point cloud library</i> globale dei beni culturali	36
2.6 La ricostruzione di edifici diruti da fotografie d'epoca: tecniche di restituzione prospettica	38
2.7 Conclusioni	39
capitolo 3 _ Rilievo e modelli digitali per il <i>Cultural Heritage</i>	41
3.1 Interpretazione e segmentazione dei dati: metodi, procedure, esperienze	41
3.1.1 Metodi	41
3.1.2 Procedure	43
3.1.3 Esperienze	48
3.2 Strumenti e procedure per la costruzione di modelli analitici	51
3.3 Modelli parametrici	55
3.3.1 Apparati strumentali	56
3.4 Dal BIM all' <i>Historic</i> BIM	57
I CASI STUDIO	63
capitolo 4 _ Le cupole su torrini attraverso le fonti documentarie	65
4.1 Individuazione dei casi studio	65
4.2 La diffusione del modello: questioni aperte	66
4.3 Cronologia e vicende costruttive delle cupole di Castiglia e León	71
4.3.1 La cupola della Catedral de la Transfiguración del Salvador a Zamora	71

4.3.2 La cupola della Catedral de Santa María De La Sede o Catedral Vieja di Salamanca.....	77
4.3.3 La cupola della Colegiata de Santa María la Mayor a Toro	85
4.4 Cronologia e vicende costruttive delle cupole siciliane.....	87
4.4.1 La cupola della chiesa del Gesù nella Casa Professa di Palermo	87
4.4.2 La cupola della chiesa di Sant’Angelo Martire a Licata.....	96
4.4.3 La cupola della cattedrale di San Lorenzo a Trapani.....	100
capitolo 5 _ Rilievo e interpretazione geometrica delle cupole su torrini.....	107
5.1 La geometria come chiave di lettura per le cupole: una nota sintetica	107
5.2 Il rilievo delle cupole: applicazioni fotogrammetriche e <i>laser scanning</i>	111
5.2.1 Castiglia e León	111
5.2.2 Sicilia	114
5.3 Note sui sistemi metrici di Sicilia e Castiglia	117
5.4 Indagini geometriche e ipotesi di progetto per le cupole di Castiglia e León	119
5.4.1 Zamora	119
5.4.2 Salamanca	127
5.4.3 Toro.....	134
5.5 Indagini geometriche e ipotesi di progetto per le cupole di Licata e Trapani	139
5.5.1 Licata	139
5.5.2 Trapani	146
5.6 Sintesi e interpretazione dei dati geometrici.....	153
5.7 Disegni e fotografie d’epoca per lo studio di architetture perdute: la cupola del Gesù.....	155
5.8 Il caso della cupola del Gesù: un’ipotesi ricostruttiva	159
capitolo 6 _ I modelli digitali delle cupole su torrini: applicazioni e verifiche strutturali	165
6.1 Interoperabilità dei modelli digitali: recenti sviluppi e questioni aperte	165
6.2 Cupole su torrini angolari: un modello efficiente?	171
 BIBLIOGRAFIA RAGIONATA	 185

«Cercare adagio, umilmente, costantemente di esprimere, di tornare a spremere dalla terra bruta o da ciò ch'essa genera, dai suoni, dalle forme e dai colori, che sono le porte della prigione della nostra anima, un'immagine di bellezza che siamo giunti a comprendere».

JAMES JOYCE

A portrait of the artist as a young man

Sorprende il modo in cui un modello d'architettura possa legare vicende e luoghi lontani, condizionare il pensiero e l'attività progettuale attraverso i secoli, suscitare fasi di intensa sperimentazione costruttiva, prima che la memoria di tale bagaglio di saperi, accumulati e perfezionati nel tempo, si diluisca e arrivi a noi sotto forma di esperienze apparentemente episodiche. Il modello in questione, una cupola su tamburo contraffortato da torrini angolari, è contraddistinto da caratteri costruttivi e formali ben definitiⁱ; tale modello appare in Castiglia alla fine del XII secolo e viene riproposto, attraverso rielaborazioni regionali, sino alla metà del Settecento. Una cupola con torrini, costruita a Palermo alla metà del Seicento a seguito di vicende apparentemente slegate dai fatti di Castiglia, produce echi tangibili sino al secolo successivo, condizionando l'attività di rinomati maestri e le vicende di cantieri prestigiosi.

Sembra questo un buon punto di partenza quando si vogliano indagare le ragioni che hanno guidato la diffusione del modello e il suo perfezionamento nel tempo. Ci si è chiesti innanzitutto come una sperimentazione ben riuscita diventi *modello*, ossia come venga depurata dalle sue manifestazioni *fisiche* e assuma un'astrazione capace di ispirare nuove opere. Secondo Umberto Eco, questo meccanismo nasce con l'uomo e con la sua primaria necessità di trovare riparo dalle intemperie; il ripararsi in una caverna offre l'occasione di osservarne lo spazio, percepirlo come limite tra esterno e interno; in questo modo si prefigura l'idea di caverna,

«utile se non altro come richiamo mnemonico, per poter pensare in seguito alla caverna come meta possibile in caso di pioggia; ma anche per poter riconoscere in un'altra caverna la stessa possibilità di riparo»ⁱⁱ

Questo processo, che Vittorio Ugo definisce come *mimesis*ⁱⁱⁱ, consta di due momenti essenziali: in primo luogo è l'osservazione a guidare la ricerca di una prefigurazione ideale della realtà; con il secondo momento, la comunicazione dell'idea, si realizza pienamente lo scopo di tale astrazione. Si manifestano così, quasi spontaneamente, i due strumenti principali della mimesi: vista e linguaggio.

Trasposto in architettura, questo passaggio dalla realtà costruita alla prefigurazione di una nuova idea, eredita i medesimi presupposti e si dota di analoghi strumenti, ossia il rilievo e la rappresentazione. Attraverso il rilievo, architetti di tutte le epoche hanno studiato gli aspetti linguistici, tecnologici e proporzionali delle opere del passato, tentando di carpirne i segreti che hanno permesso di vincere la sfida della gravità e mantenere l'armonia tra le parti; l'epifania del rilievo, ossia il Modello^{iv}, confluisce in rappresentazioni orientate, come disegni e maquettes; spesso, gli scopi di tali rappresentazioni costituiscono i presupposti per altre teorie, per nuove sperimentazioni, o ancora per correzioni di errori che altri hanno commesso, secondo un processo ciclico che Federica Ottoni ha efficacemente accostato al mito di Prometeo^v.

Se nelle prime raccolte di disegni medievali permangono fini prevalentemente emulativi, precetti da seguire poiché già sperimentati da altri, i modelli fisici mantengono una dimensione legata alla prefigurazione e alla verifica costruttiva; nel corso della trattazione ci si riferirà a espedienti legati alla costruzione delle cupole, ma sono altresì ben note le ricerche di Leonardo Da Vinci sui cinematismi degli archi, o ancora le intuizioni

di Vitruvio in merito al modo in cui il peso si scarica negli archi. Solo in seguito i modelli divengono strumenti per l'elaborazione di un nuovo linguaggio progettuale. Questo processo ha arricchito e perfezionato il bagaglio di tecniche, tramandato dapprima all'interno delle botteghe artigiane e in seguito nelle biblioteche degli ordini monastici; i segreti dell'*ars aedificatoria*, un tempo tramandati tra pochi eletti, sono riversati nei trattati, che costituiscono i principali strumenti di diffusione del sapere per molti secoli.

Il caso delle cupole a torrini rappresenta un punto di vista privilegiato per indagare le possibili declinazioni formali e strutturali del modello, le cui tracce sono andate in parte perdute; il tema della cupola, oltre a mantenere una forte connotazione simbolica perché metafora del Regno Celeste, ha sempre costituito una sfida sulla quale si è misurata l'abilità di architetti e ingegneri. Prima che il calcolo matematico rivoluzionasse il modo di pensare tali opere, l'osservazione del passato e la prefigurazione dell'idea erano gli unici strumenti per evitare l'errore; i criteri di dimensionamento, che venivano desunti dalle proporzioni e dalle geometrie rilevabili nelle fabbriche sopravvissute alla storia, vengono riproposti e rielaborati in nuove opere.

Lo studio dell'architettura, condotto attraverso i rilievi, è stato quasi sempre orientato a rivelare, attraverso l'analisi geometrica, lo schema progettuale di un'opera, che diviene modello per nuovi progetti. Lo scopo di questa ricerca è ricostruire, ancora una volta con il rilievo e l'interpretazione geometrica, una trama di relazioni tra opere costruite in tempi e luoghi distanti tra loro, per rintracciarne le matrici progettuali e definirne i possibili percorsi evolutivi.

Lo sviluppo tecnologico degli strumenti per il rilievo e la rappresentazione, avviato agli inizi degli anni Novanta del secolo scorso, ha raggiunto esiti inattesi sotto il profilo delle potenzialità operative e dell'automazione dei processi; oggi è possibile produrre modelli digitali ad alta definizione con procedure semiautomatiche e in tempi estremamente contenuti. Inoltre, le possibilità che i nuovi strumenti offrono nei processi di conoscenza dell'architettura, costituiscono il presupposto per nuove linee d'indagine sulle cupole a torrini. Nel corso della ricerca sono stati eseguiti i rilievi dei manufatti individuati in Castiglia e in Sicilia; i simulacri acquisiti sono stati sottoposti a un'indagine geometrica che ha posto in evidenza gli elementi di continuità e le differenze sotto il profilo proporzionale, consentendo di individuare tracciati regolatori comuni frutto di possibili criteri progettuali condivisi; l'indagine geometrica ha altresì permesso di verificare alcune ipotesi sulle vicende costruttive delle fabbriche. Infine, le matrici geometriche individuate sono state rappresentate attraverso modelli digitali, che hanno permesso di verificare ipotesi legate all'efficacia statica dei torrini.

ⁱ Il modello è costituito da un tamburo ottagonale o circolare, serrato agli angoli della crociera da quattro contrafforti a sezione circolare e coperto da una calotta che assume configurazioni a profilo circolare o acuto, sormontata da lanterna nei casi più recenti.

ⁱⁱ ECO 1967, p. 58.

ⁱⁱⁱ UGO 1992, pp. 9-23.

^{iv} Per usare una definizione di Riccardo Migliari che sarà ampiamente trattata in seguito.

^v OTTONI 2008, pp. 1-3

PARTE PRIMA
DAL RILIEVO ALLA RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA:
QUESTIONI METODOLOGICHE

capitolo 1 _ Misurare/conoscere/ricostruire

«Misura ciò che è misurabile, rendi misurabile ciò che non lo è».

(GALILEO GALILEI)

1.1 misurare/conoscere/...

In un passo del *Politico*, Platone riconosce all'arte del misurare un ruolo preminente fra le scienze, per la necessità di «costringere il più e il meno a diventare commensurabili non soltanto fra loro ma anche in relazione al generarsi della *giusta misura*»¹. Due, secondo il filosofo, sono i modi di misurare:

da un lato secondo le reciproche relazioni cui prendono parte grandezza e piccolezza, dall'altro secondo la necessaria esistenza di ciò che viene generato. [...]

Tutti gli elementi che si trovano nell'arte partecipano in certo senso della misura: ma siccome non si ha l'abitudine di indagare dividendo secondo le specie, si fanno direttamente convergere in un medesimo punto tali cose tanto differenti, ritenendole simili, e si fa anche l'opposto quando si dividono le altre cose non secondo le specie. Bisognerebbe invece, non appena si faccia esperienza della comune partecipazione di molte cose, non andarsene prima di aver scorto in essa tutte le differenze, quante sono quelle basate sulle specie, e qualora si osservino nella molteplicità le dissomiglianze di ogni sorta, non dovrebbe essere possibile smettere di osservarle turbati, prima di aver messo insieme nell'essere di un genere tutto ciò che gli è connaturato, rinchiudendolo dentro un'unica somiglianza.²

Tale riflessione introduce una tra le più raffinate analisi del concetto di misura, inteso come processo di confronto tra le parti per la ricerca della *giusta misura*, o, in altre parole, del concetto stesso di *esattezza*. Nel corso dei secoli, il principio di esattezza è sempre stato legato all'ambito delle scienze teoriche e ai tentativi di spiegare i fenomeni della realtà con astrazioni e semplificazioni matematiche; l'ambito della tecnica, al contrario, ha avuto una prevalente connotazione imperfetta, manifesta negli inevitabili difetti delle produzioni artigianali e nell'uso di unità di misura antropometriche. È ben nota la *querelle* fra scienza e tecnica³ che ha animato il dibattito sul principio di esattezza fino alla rivoluzione industriale, e si intende qui riproporla attraverso le parole di Alexandre Koiré:

Volere applicare la matematica allo studio della natura è commettere un errore e un controsenso. Nella natura non ci sono cerchi, ellissi, linee rette. È ridicolo voler misurare con esattezza le dimensioni di un essere naturale: il cavallo è senza dubbio più grande del cane e più piccolo dell'elefante, ma né il cane né l'elefante hanno dimensioni strettamente e rigidamente determinate: c'è dovunque un margine di imprecisione, di «giuoco», di «più o meno», di «pressappoco».⁴

L'importanza di produrre e misurare con esattezza diviene determinante con il passaggio dalla tecnica alla tecnologia. Alla base della tecnologia è l'applicazione delle scienze al controllo della realtà, prescindendo dalla natura contingente che ne contraddistingue i fenomeni; per conseguire un fine tanto ambizioso, si pongono due questioni essenziali: innanzitutto l'uso di idonei strumenti di misurazione, universali e dotati di un elevato grado di precisione; in secondo luogo la capacità di conoscere e ridurre l'entità dell'errore commesso. Alla luce di tali considerazioni sembrerebbe che qualsiasi tentativo di misurare la realtà, ossia ridurre in numeri (quantità esatte) fenomeni e oggetti imperfetti, celi un problema insolubile; tale difficoltà è ancor più evidente nell'ambito dell'architettura: nel caso di una nuova costruzione, il progetto, concepito nella sua configurazione geometrica ideale, dovrà adattarsi alle irregolarità del sito e alle imperfezioni di

natura costruttiva; nel caso del rilievo di opere esistenti, il tentativo di registrare la realtà riconducendola a numeri e figure geometriche implica di per sé delle imprecisioni.

Anche in un'era in cui il processo tecnologico ha ampliato a dismisura la precisione degli apparati strumentali, la difficile relazione che si vuole stabilire tra la perfezione dei numeri e l'imperfetto mondo reale rende complessa la stessa definizione del concetto di misura⁵: se da un lato, infatti, si dispone di strumenti e apparati ordinatori (principi geometrici, rapporti armonici) privi di affezioni contingenti o soggettive, dall'altro vi è la natura "fisica" dell'architettura, e il suo subire le azioni del tempo e della gravità, che richiede uno sforzo interpretativo nel processo di conoscenza del manufatto. Se infine si tiene conto anche delle implicazioni legate alla percezione, è evidente che il concetto di misura non possa essere ridotto alla semplice accezione letterale. Non è questa la sede per affrontare un tema tanto vasto come quello della percezione, ma se ci si domanda in quanti modi sia possibile rappresentare la stessa scena reale, si può senz'altro affidare la risposta alle numerose tele della cattedrale di Rouen dipinte da Monet. Questo tentativo del pittore impressionista, può essere inteso come uno dei tanti modi per misurare la realtà? Se ci si affranca dalla tradizionale accezione del misurare *in metri* la risposta è senz'altro positiva⁶.

In ambito matematico, la misura esprime il rapporto tra grandezze, ottenuto riferendole a una terza, assunta convenzionalmente come unitaria. In ambito musicale la misura è scandita dalla battuta, ossia la durata di tempo minimo di una nota. La forma scritta di una composizione musicale si contraddistingue per la capacità di scomporre la continuità del suono in punti discreti, vale a dire una scala di misure ordinate secondo tempi e modi prestabiliti, che giunge alla riproduzione di un unico e armonioso suono. Non è certo un caso che, da Vitruvio in poi, la musica abbia fornito numerosi elementi di raffronto per i teorici di architettura, e che autorevoli pensatori, tra cui Friedrich Schelling, definiscano l'architettura come musica concreta, sospesa tra la sua natura materica e la sua componente razionale e ideale.

L'architettura aderisce perfettamente alla musica giacché un bell'edificio altro non è che una musica percepita tramite l'occhio, un concerto di armonie e combinazioni armoniche afferrato, non nella successione temporale, ma in quella spaziale.⁷

Ciò conduce ad analogie anche con la misura dell'esistente o di quanto già costruito, poiché, si giunge alla conoscenza di un'opera architettonica attraverso la scomposizione nelle sue parti e la ricerca dell'ordine ad esse sotteso.

Alla voce *misura* del *Dizionario Storico di Architettura*, Quatremère de Quincy chiarisce la natura convenzionale del misurare e propone la consolidata distinzione tra le fasi di acquisizione e rilievo⁸ affermando che:

Con questa denominazione chiamasi ciò che serve di regola per misurare una quantità. Questa sorta di regola varia secondo i luoghi, i tempi e gli oggetti, cui viene applicata.

(...)

L'idea generale di misura entra sotto tanti rapporti nelle combinazioni dell'Architettura, che vi si potrebbe riferire tutta la teoria di quest'arte, perocchè le proporzioni sulle quali essa si fonda altro non sono che calcoli di misura.

Misura significa pur anche *dimensione*; perciò dicesi prendere le misure di un edificio, d'una colonna ecc.. Quando si leva una pianta, è lo stesso che dire la misura delle dimensioni di ciascuna parte. In questa operazione si prendono le misure riportando sulla carta quelle che vengono determinate da qualche strumento.⁹

Sebbene l'acquisizione del dato metrico possa avvenire attraverso strumenti di vario genere, e in momenti distinti, l'operazione di «riportare sulla carta» (o in ambiente tridimensionale) la misura, implica necessariamente un atto critico, un metodo di lettura dell'informazione acquisita secondo criteri predeterminati, ossia diviene uno strumento per il controllo della realtà.

La misura è di per sé un processo di semplificazione finalizzato alla comprensione della realtà¹⁰ e, per tale ragione, assume una valenza soggettiva: quando ci si riferisce al rilievo di un oggetto o di un edificio, si è indotti a pensare che esso sia scientificamente e universalmente ripetibile; tuttavia, a una più attenta analisi, emerge che il processo che permette di conoscere quel manufatto, ossia il rilievo, è tutt'altro che univoco, perché dipende in gran parte dalla sensibilità di chi lo esegue e dalle necessarie approssimazioni imposte dalla complessità dell'opera.

Secondo tali presupposti, non v'è dubbio che la misura sia un processo cognitivo, la cui genesi ha origine con l'uomo stesso e con la sua esigenza di conoscere il mondo circostante, di organizzarne gli spazi, di stabilire delle differenze. Come ricorda Gregotti¹¹, il termine misura condivide la medesima radice con il termine *modus*, e il concetto di *modus* è riferibile all'idea di misura. La necessità di razionalizzare la natura di uno spazio è la condizione essenziale per abitarlo; da ciò si spiega ogni tentativo dell'uomo di imporre limiti fisici e geometrici in grado di produrre un ordine nell'ambiente circostante. Attraverso la misura, l'uomo giunge al luogo di incontro tra ciò che è noto e ciò che non lo è ancora, ciò che è razionale e ciò che deve ancora essere compreso, stabilendo relazioni tra sé e lo spazio che lo circonda; e quale migliore strumento di confronto con la realtà se non lo stesso corpo umano? Il piede, il pollice, il palmo, sono le prime unità di misura antropometriche introdotte.

In termini architettonici il concetto di misura è legato alla capacità di ridurre in parti, ossia di riconoscere, all'interno di un unico insieme di forme e materiali legati tra loro, un sistema di *moduli* organizzati secondo un ordine prestabilito: la ricerca dei rapporti armonici e delle geometrie impiegate nella composizione delle parti è solo uno tra gli strumenti di tale processo. Ancora Quatremère de Quincy prosegue con la voce *misurare*:

Con questo mezzo si acquisisce una precisa cognizione della proporzione di un edificio. Per le cure che sonosi presi i moderni architetti di misurare i monumenti antichi, noi possiamo formarci una giusta idea del sistema delle loro proporzioni, tanto nell'insieme, quanto in tutte le parti di cui esso è composto.

Ma se è stato finora affermato che il rilievo è caratterizzato da una forte componente soggettiva, come rendere scientificamente valido e ripetibile l'intero processo? L'insieme di punti acquisiti da uno scanner laser o ricavati dagli algoritmi dei software SfM, non costituisce ancora un modello; è piuttosto un simulacro digitale dell'opera su cui compiere le operazioni di misura. Come ricorda Riccardo Migliari, l'acquisizione di una nuvola di punti è di per sé un dato oggettivo,

nel senso che, se le misure fossero eseguite con uno strumento di analoghe prestazioni, è ragionevole credere che restituirebbero il medesimo risultato. Ma questa descrizione è una mera raccolta di coordinate tridimensionali, peraltro affette da un'incertezza nota [l'accuratezza dello strumento], e nulla ci dice ancora (...) sulla idea progettuale.¹²

Le procedure che da tali dati conducono alla costruzione di un modello, implicano uno sforzo interpretativo costante, mirato a determinare, volta per volta, il livello di discretizzazione necessario alla rappresentazione dei singoli elementi architettonici, i rapporti armonici tra le parti, le unità di misura impiegate per la realizzazione. Attualmente le procedure che conducono alla generazione dei modelli garantiscono fedeli e dettagliate ricostruzioni delle superfici rilevate, ma la crescente automazione del processo spesso conduce a eludere l'onere dell'interpretazione del dato acquisito¹³.

1.2 .../conoscere/ricostruire

Sulla scorta di quanto già detto in merito al legame che intercorre tra misura e conoscenza possiamo affermare che il rilievo d'architettura giunge sempre alla costruzione di una rappresentazione orientata (componente soggettiva) di un insieme di dati dimensionali o informativi (componente oggettiva), condizionata dalle finalità dell'approccio (analisi strutturale, geometrica, costruttiva, storica), o, in altre parole,

Architectural surveying is a reverse process which starts from the real object, rebuilds a digital model and interprets the idea which is upstream of its realization.¹⁴

Occorre ora chiarire come, attraverso la conoscenza di un'opera ottenuta con la misura, si arrivi alla sua ricostruzione. Ci si interroga innanzitutto su cosa possa essere ricostruito attraverso la misura. Come afferma Migliari, il rilievo di un'opera mira alla «ricostruzione del progetto»¹⁵. Tale assunto implica che, nel misurare un'opera, sia necessario fare riferimento a una serie di norme, spesso celate dal tempo, che l'autore ha impiegato nel processo progettuale; in altre parole, a partire dalla "riscoperta" di tali apparati regolatori ha inizio il processo ricostruttivo, che procede a ritroso fino a prefigurare una ricostruzione congetturale del percorso progettuale. La ricostruzione, basandosi sulla trasposizione numerica di una realtà di per sé imperfetta, implica una riduzione critica delle informazioni osservabili e registrabili, una sintesi della realtà che, pur rappresentando un impoverimento della sua complessità, ne consente una più agevole lettura orientata.

Lo strumento che consente una così potente ed efficace sintesi è il disegno; il suo ruolo è da sempre quello di dare forma all'architettura, sia nel percorso ideativo che nei modi attraverso i quali l'architettura viene descritta o narrata. Per tale ragione è corretto considerare il disegno, e le tecniche impiegate per produrlo, come progetti essi stessi, e pertanto accettare l'impossibilità di un approccio neutrale all'analisi di opere e disegni ereditati dal passato. Anche per i disegni di rilievo valgono le stesse considerazioni, poiché, il rilievo di un'opera implica innanzitutto la capacità di interpretarne lo *schema*, selezionando quanto è utile rappresentare e quanto può invece essere tralasciato.

Il disegno è storicamente legato all'imitazione di un modello. I bozzetti preparatori che Pablo Picasso perfezionava per il disegno di un toro [fig. 1], dimostrano che la rappresentazione non mira mai alla produzione di una copia della realtà, bensì alla sua riduzione a modello.

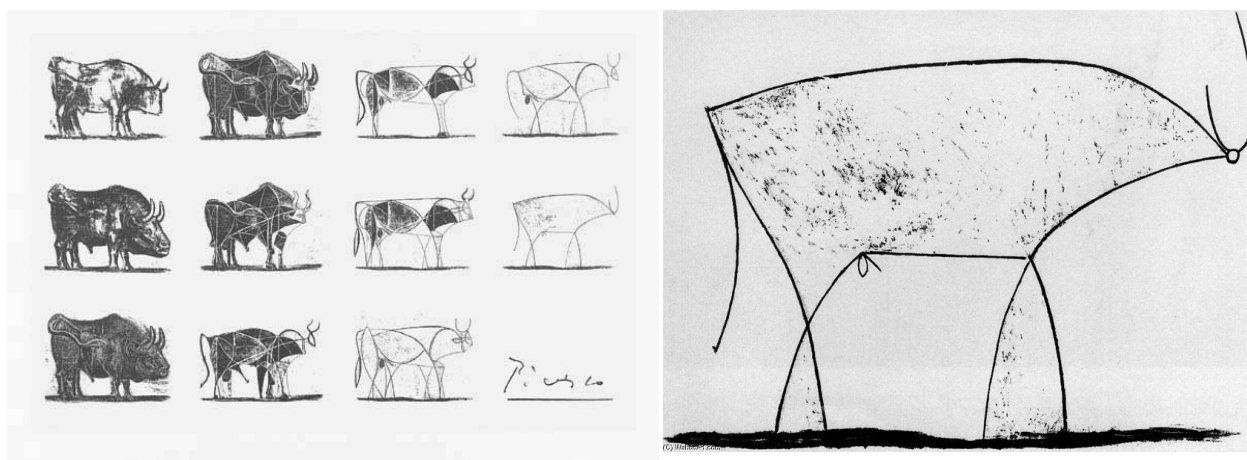


Figura 1; Picasso, *Toros*, serie di litografie; in dettaglio *Undécimo estado*.

In un illuminante brano di Italo Calvino¹⁶, magistralmente riproposto e commentato da Riccardo Migliari¹⁷, è espressa (quella che ci sembra) la nozione più profonda del concetto di *mimesi*. Rimandando per esaustività alla lettura del brano, nel testo si narra dell'incarico di disegnare un granchio affidato dal re al pittore Chuang-Tzu. Il disegno richiese a Chuang-Tzu ben dieci anni di osservazione di quell'animale, per coglierne i tratti più significativi, perfezionando nella propria mente l'immagine di quell'unico granchio che potesse costituirsi come modello per le centinaia di granchi osservati.

Il fatto è che il pittore dovette esaminare, e con la più scrupolosa attenzione, mille granchi vivi e liberi, tutti diversi, per disegnarne uno solo, che assomigliasse a tutti: anzi, uno solo, che fosse l'immagine dell'idea del granchio. E per far ciò, Chuang-Tzu dovette scegliere quel che i mille avevano in comune, aiutandosi con la ragione, con la sensibilità e l'intelligenza del pittore. Ad esempio: quella piccola piega che nel bordo inferiore delle chele forma il dente che macina le carni della preda; quella lieve escrescenza dello scudo che ne rende temibile l'aspetto ... e così via. Non solo: per ciascuno di questi minimi dettagli, Chuang-Tzu dovette studiare la forma più adatta del pennello e il gesto e la pressione della mano e la giusta dose di inchiostro e il suo colore. Ma alla fine della decennale fatica, con un sol gesto, il Modello si trasferì, perfetto, sulla carta (...).¹⁸

In virtù del suo ruolo disvelatore, il disegno di architettura non può limitarsi alla semplice copia, ossia alla riproduzione dell'aspetto di un'opera secondo criteri predefiniti; sebbene ogni disegno possieda un certo grado di astrazione rispetto al dato fenomenico, il rischio di produrre un'acritica restituzione metrica permane. Affinché il disegno assuma quindi una valenza scientifica, occorre che esso diventi modello di ciò che raffigura, ponendosi come strumento di conoscenza, prefigurazione e confronto. Attraverso la costruzione del modello, o la ricostruzione (nel caso del rilievo dell'esistente), si completa il percorso che dalla misura giunge alla conoscenza dell'opera. In questo processo, il disegno diviene chiave per la comprensione delle matrici progettuali di un'opera di architettura.

Occorre quindi distinguere lo studio delle opere di architettura di cui sono noti i disegni di progetto da quello delle architetture delle quali non è rimasta documentazione grafica. Nel primo caso, lo studio dei disegni consente di valutare la distanza tra progetto e opera realizzata, il modo di formazione dell'idea progettuale, la relazione tra modi della rappresentazione e progetto (grafici 2D, modelli fisici, *reverse engineering*, modelli virtuali), nonché le analogie con altri disegni di architettura; ad eccezione della distanza tra disegno ed opera realizzata, lo stesso può dirsi dei disegni di architetture non realizzate. Nel secondo caso, lo studio è finalizzato a "ritrovare" il disegno di progetto dell'opera e quindi, pur utilizzando strumentazioni moderne, deve giungere alla ricostruzione dell'idea progettuale tenendo in considerazione gli strumenti della rappresentazione, le conoscenze tecniche del periodo in cui l'opera venne realizzata e, laddove disponibili, i disegni a cui l'architetto avrebbe potuto ispirarsi.

1.3 Modelli: mimesi e interpretazione

Il principio di astrazione che caratterizza la *mimesi* è ripreso nella definizione di modello data da Giulio Giorcello¹⁹. Egli chiarisce che il modello allude a una descrizione «impoverita» della realtà ma che, proprio per questo, è in grado di evidenziarne alcune proprietà. La stessa astrazione è associata da Quatremère de Quincy al termine *tipo* (che egli impiega *in vece* del termine modello), svelando, come ricorda Fabrizio Agnello, «un contesto ancora condizionato dalla natura classificatoria e tassonomica dell'approccio illuminista alla conoscenza. Il tipo è infatti una categoria utile ad ordinare in maniera trasmissibile la complessità e la multiformità della produzione architettonica»²⁰.

Bisogna innanzitutto operare una distinzione tra *Modello*²¹, inteso come idea progettuale o di riferimento, e le sue manifestazioni, anch'essi modelli o rappresentazioni tendenti all'idea originaria [fig. 2]. A questo scopo è utile tenere presente quella che Riccardo Migliari definisce «centralità del Modello», ossia la sua preminenza rispetto alle rappresentazioni possibili (disegni, maquettes, prototipi e modelli 3D).

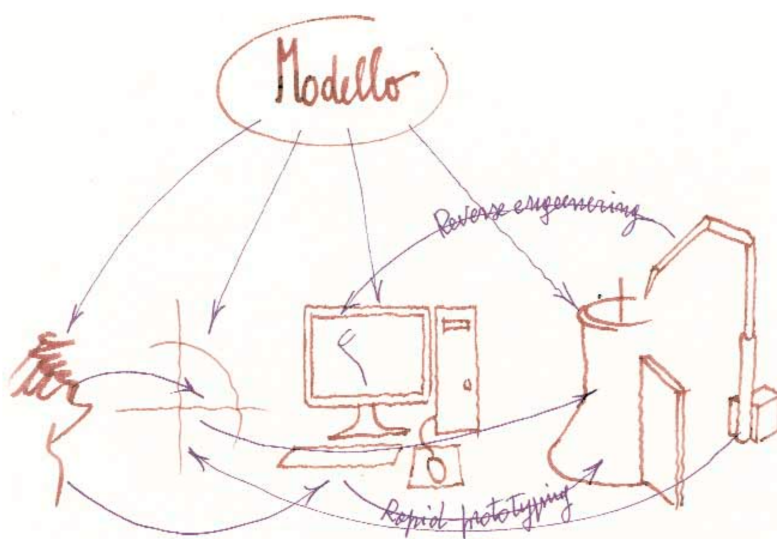


Figura 2; questo schema esprime il rapporto tra il Modello, idea progettuale prefigurata nella mente dell'autore, e le sue innumerevoli rappresentazioni. MIGLIARI 2004, op.cit., p. 9.

Il disegno e i plastici costituiscono da sempre gli strumenti indispensabili alla formazione del pensiero architettonico, configurandosi quindi come validi rimandi al *Modello*. Le vicende che riguardano l'uso di modelli in architettura appaiono tuttora lacunose e a tratti piene di incongruenze; tuttavia alcuni momenti storici aiutano a definire meglio il ruolo che essi hanno assunto nel tempo. La prima difficoltà nel ripercorrere la storia del modello di architettura è dovuta alla stessa ambiguità del termine e al suo uso nelle fonti archivistiche.

Nella preziosa raccolta di disegni su pergamena di Villard de Honnecourt, risalente agli anni Venti del Duecento, «si può finalmente apprezzare quel dialogo tra la mente del progettista e il disegno, che costituisce l'essenza del progetto e che caratterizza i disegni predisposti a questo scopo»²². La raccolta costituisce uno dei primi esempi documentati dell'uso di modelli per l'architettura poiché le tavole sono impiegate dall'autore come strumento di emulazione, verifica e ispirazione per future realizzazioni²³. Pertanto, i disegni di rilievo dello spartito murario nella cattedrale di Reims si prestano per prefigurare rielaborazioni e varianti linguistiche sul tema (aggiunta di trifore cieche ed elementi decorativi) [fig. 3], o ancora i disegni delle absidi – prodotti secondo un rudimentale e intuitivo effetto tridimensionale – riportano tratti marcati che accentuano la verticalità degli apparati strutturali, come se l'autore avesse voluto affidare al disegno la memoria delle sue idee progettuali [fig. 4]. A dire il vero, siamo in presenza di una rappresentazione che, se intesa come strumento per la conoscenza dell'architettura, appare ancora in uno stato embrionale; il motivo è efficacemente espresso da Erwin Panofsky, secondo cui tra gli scritti di Villard de Honnecourt e quelli di Alberti si può ravvisare la medesima differenza che c'è «tra una raccolta di ricette farmaceutiche e un'opera di biochimica»²⁴. Nel trattato medievale, l'intento è la descrizione delle corrette procedure da applicare per la costruzione (il giusto metodo per tagliare le pietre, la disposizione geometrica degli edifici), senza affrontare le ragioni di tali scelte, come avverrà invece nei trattati di epoca successiva. Anche la natura di tali modelli, quindi, non può che essere esclusivamente didascalica, ossia esemplificativa della regola dell'arte, ma nulla aggiunge allo sviluppo di altre soluzioni. D'altra parte, è lo stesso Villard ad aprire il suo taccuino con una simile dichiarazione d'intenti: apprendere dagli antichi le regole applicate, per poterle replicare.



Figura 3; Villard de Honnecourt, Album, France (Picardie), XIII secolo, Parigi, BnF, *département des Manuscrits*, Français 9093, fol. 60, cattedrale di Reims, interno del paramento murario.



Figura 4; Villard de Honnecourt, Album, France (Picardie), XIII secolo, Parigi, BnF, *département des Manuscrits*, Français 9093, fol. 61, cattedrale di Reims, esterno dell'abside.

A superare tali limiti è Leon Battista Alberti, che rivisita i precetti di Vitruvio traendone principi generali sui quali fondare una teoria; lo strumento è sempre il rilievo, l'osservazione dell'architettura del passato, ma questa volta l'atteggiamento è tutto differente.

Tornando all'uso dei modelli, in Italia le prime notizie documentate sembrerebbero risalire alla metà del XIV secolo²⁵. La commistione tra i termini *architector* e *faber lignarius*, che si registra già dal Medioevo e permane in Sicilia sino al XVI secolo, dà prova inequivocabile dello stretto legame esistente tra l'attività intellettuale che conduce alla generazione dell'idea di progetto e la sua concretizzazione per mezzo di un modello grafico o ligneo. Certamente non insolite dovevano essere le abilità di ebanisti e falegnami di quell'epoca nel saper leggere e produrre disegni in scala e «le mutazioni di status, la possibilità cioè di rivestire il ruolo di architetto, partendo dal mondo dei mestieri, delle corporazioni o, più in generale, da condizioni iniziali diverse, contano molteplici casi»²⁶.

Nel Quattrocento, in ambito mitteleuropeo, i modelli lignei sono utilizzati come strumento per la veicolazione delle esperienze progettuali, probabilmente per la loro capacità di raffigurare in tre dimensioni elementi dalla geometria complessa e, questione assai più rilevante, per la possibilità di prefigurare e simulare comportamenti statici connessi alle fasi costruttive. I modelli lignei in scala vengono prodotti con lo scopo di promuovere l'opera agli occhi della committenza, ovvero per meglio definirne gli aspetti tecnologici e costruttivi. In molti casi il modello fisico è riprodotto in una dimensione tale da essere percorribile al suo interno, o, nei casi più complessi, anche in scala reale. I modelli fisici, sebbene dispendiosi in termini economici, consentivano una più immediata lettura della proposta progettuale da parte della committenza, e assumevano un ruolo di garanzia sugli esiti del cantiere.

La valenza descrittiva del modello fisico è parte integrante della produzione progettuale di Palladio (Basilica di Vicenza) e Michelangelo (Palazzo Farnese a Roma o ancora la cupola del San Pietro), mentre, come già accennato, l'attività di ideazione del progetto sembra rimanere strettamente legata al disegno (si veda ad esempio il celebre disegno di Michelangelo per la cupola di San Pietro). I modelli grafici prodotti a Roma nel primo Cinquecento riproducono e affinano gli esempi classici, secondo un approccio che non si limita all'emulazione e al rispetto dei canoni codificati da Vitruvio, ma consegue intenti reinterpretativi del patrimonio linguistico attraverso l'elaborazione intellettuale. Agli «accademismi neoclassici» si contrappongono approcci orientati a una maggiore libertà creativa; secondo Luciano Patetta²⁷, il ridisegno dei templi greci, realizzato dai viaggiatori del *Grand Tour* a seguito del rinnovato interesse per il classico, ha di fatto tutte le caratteristiche di vero e proprio «progetto neoclassico»; ciò conferisce ai modelli il compito di trasmettere conoscenza, misurando quanto già costruito e rielaborando nuove soluzioni compositive.

Dalle nuove scoperte archeologiche del XVII secolo scaturisce un differente rapporto tra archeologia e architettura che, oltre a fornire nuovi contributi per le conoscenze storiche, mira a revisionare la trattatistica pregressa e le relative codificazioni linguistiche. Il passo verso la riproposizione della grandezza perduta era fin troppo breve e spesso l'oggettività del rilievo era la base per grandiose ricostruzioni e anastilosi.

Tra Seicento e Settecento l'impiego dei modelli fisici, divenuto sempre più frequente nella pratica professionale di architetti e ingegneri, favorisce la prefigurazione di soluzioni tridimensionali complesse, assicurando un maggiore controllo sulle forme e la verifica delle soluzioni adottate; esemplificativi sono, ad esempio, i casi della monumentale facciata della chiesa di Sant'Anna a Palermo, ideata da Giovanni Biagio Amico²⁸, e del progetto di Stefano Ittar per la chiesa di San Martino dei Bianchi di Catania²⁹: nel primo caso, la necessità di realizzare un modello ligneo, di cui si dà notizia in una relazione di Francesco Ferrigno del 1751, dimostra come tale strumento abbia potuto contribuire, più dei convenzionali disegni in doppia proiezione, al controllo dell'andamento curvilineo della facciata; nel secondo caso, il confronto tra il modello raffigurante la prima proposta progettuale di Ittar e l'opera realizzata permette di ricostruire quali espedienti siano stati impiegati dall'autore per migliorare l'opera. Soprattutto in quest'ultimo caso, sebbene non sia noto in che misura la prefigurazione fisica in una maquette abbia contribuito alla variazione del progetto, è evidente che la stessa realizzazione del modello abbia permesso una più agevole rielaborazione dell'idea originaria.

Un tema a parte sembra riguardare la produzione di modelli per le cupole, la cui complessità rende senz'altro necessaria la costruzione di un simulacro, che serva da strumento di verifica dell'avanzamento lavori o che sia utile alla definizione di particolari aspetti tecnologici. In questi casi la costruzione del modello diventa quasi una «consuetudine obbligatoria»³⁰, specie nella professione degli architetti del Seicento e Settecento siciliano, che forse più di altri hanno ben presente gli effetti disastrosi dei terremoti³¹; non sembra un caso che, dopo il sisma del 1693 e in un intervallo di soli quarant'anni, si costruiscano modelli lignei per le cupole nelle chiese di Sant'Angelo a Licata (1693), di Sant'Ignazio all'Olivella a Palermo (1731 e 1774 ma con altri scopi) e di San Lorenzo a Trapani (1734), modelli che sottolineano l'attenzione posta dai tecnici in un tema così complesso e delicato come la cupola.

Solo di recente, con l'avvento dei nuovi processi produttivi assistiti da calcolatori e in grado di produrre in poco tempo modelli in scala 1:1, l'accezione di modello si è progressivamente accostata alla definizione di prototipo; ciò è evidente se si guarda alle produzioni industriali, mentre, tale binomio investe in misura minore l'ambito dell'architettura ed è comunque limitato al caso della realizzazione di componenti tecnologiche o di design. Il progresso informatico, infine, ha prodotto un nuovo modo di concepire il modello d'architettura; un modello digitale, infatti, non si limita esclusivamente alla rappresentazione di uno schema, bensì può rappresentare con estrema precisione la matrice dell'oggetto finale, da cui è possibile generare automaticamente copie fedeli, o ancora simulare con grande affidabilità gli effetti di fenomeni naturali sull'opera, al fine di prevedere comportamenti non immediatamente apparenti (calcolo degli apporti energetici, simulazioni sugli impatti paesaggistici, etc.).

Oggi la simulazione non si riferisce più all'uso della maquette fisica, ma alla computerizzazione *in fieri* del modello per studiare le implicazioni delle interazioni delle parti del sistema. Le simulazioni sono generalmente iterative in questo sviluppo. Si sviluppa un modello, lo si simula, s'impara dalla simulazione, si revisiona il modello, e continua l'iterazione fino a che è sviluppato un adeguato livello di comprensione. Questa qualità è assai marginale nei modelli tradizionali, mentre rappresenta il carattere dei modelli digitali.³²

In sintesi, se riferito all'esistente, il modello ottenuto dal rilievo ha assunto e consolidato nel tempo il ruolo di strumento per la prefigurazione della realtà. Le libere reinterpretazioni dei canoni classici, o ancora le fantasiose ricostruzioni dei siti diruti, inducono poi a oltrepassare i limiti della "fedele rappresentazione", affidando ai modelli un ruolo interpretativo e, in alcuni casi, creativo o di simulazione. Tale ruolo è ancor più evidente nei modelli che la scienza usa per conoscere i fenomeni fisici e governarne gli effetti (la teoria ondulatoria e le telecomunicazioni, ad esempio). I modelli strutturali impiegati per valutare le risposte degli edifici a eventi sismici sono ottenuti riducendo l'opera alle sue parti resistenti, eliminando dal modello quanto non necessario a fornire una risposta in termini statici o elastici. Condizione analoga si verifica nello studio dell'architettura, con una duplice valenza: in primo luogo, la costruzione del modello è il momento di formazione dell'ipotesi interpretativa; l'opera, concepita nella sua interezza è perfezionata progressivamente attraverso la sua rappresentazione; in secondo luogo, il modello è impiegato come strumento per la verifica e la formazione di nuove ipotesi, che richiederanno, per la loro validazione, ulteriori osservazioni "orientate" sul reale. Tale processo non è governato da un rapporto di causa-effetto o determinato da sequenze temporali predefinite; come chiarisce Paul Feyerabend nel suo volume *Contro il metodo*, ogni fatto singolo dipende da qualche teoria, ma esistono anche fatti spiegabili solo attraverso il ricorso ad alternative alla teoria; l'autore, nell'affrontare il tema sull'ipotesi eliocentrica di Galilei, afferma che lo scienziato ha partorito già dal principio l'idea di un modello eliocentrico dell'universo, idea che attende solo di essere verificata: si tratta in questo caso di una "osservazione orientata", quindi di un "ri-conoscere"³³.

Si è finora descritto il processo che dalla misura conduce alla costruzione di un modello. Ma se ampliamo il significato di misurare anche a caratteri non strettamente riducibili a quantità numeriche, ci si accorge che lo stesso modello diviene strumento di misura per l'architettura. Quando Monet si decise a raffigurare *Notre Dame*, aveva presumibilmente già osservato la cattedrale, ne aveva notato le forme snelle e allungate e aveva inevitabilmente prefigurato nella sua mente uno schema proporzionale ben preciso. A quel punto l'artista decise di fissare il punto di vista da cui osservare l'opera e iniziare a misurarla; possiamo immaginare che, come farebbe ognuno di noi oggi, si mise alla ricerca di un punto di vista privilegiato, dal quale annotare le sue "misure" nel modo più esaustivo possibile. Infine gli bastò attendere gli effetti che la luce produceva sulla cattedrale nelle diverse stagioni per "registrare" le sue osservazioni [fig. 5]. Il caso di Rouen può senz'altro apparire lezioso se ci si riferisce al tradizionale significato di misura; tuttavia, come chiarisce Vittorio Ugo³⁴, il concetto di misura può assumere un senso più ampio se estendiamo il significato di *unità di misura* dal metro a tutti i riferimenti culturali e agli strumenti per la produzione dell'opera. Occorre quindi valutare la specifica unità di misura da impiegare, sia essa dimensionale (metro, equivalenti antropometrici) o qualitativa. Nel caso di Rouen, *misurare* può significare valutare gli effetti plastici della luce sulle architetture alle diverse ore del giorno.



Figura 5; Monet, *La Cattedrale di Rouen*, serie.

Più in generale, tornando a usare il concetto di misura come confronto, una misura qualitativa può voler dire stabilire la corretta distanza tra un'opera architettonica e la produzione coeva; valutare il contributo che l'opera fornisce alla cultura del periodo, o di quanto se ne allontani; stimare quanto essa contribuisca alla formulazione di teorie dell'architettura, ossia il suo valore di modello per architetture da venire e, in definitiva, la raffigurazione come luogo per la formazione e l'esplicitazione di un'ipotesi interpretativa. In tali processi il modello assume indubbiamente un ruolo centrale e pertanto il paradigma iniziale misurare/conoscere/ricostruire potrebbe essere riformulato come un processo ciclico di conoscenza, interpretazione e validazione al cui centro è il Modello stesso, e che si esplicita nelle diverse forme attraverso la rappresentazione [fig. 6].

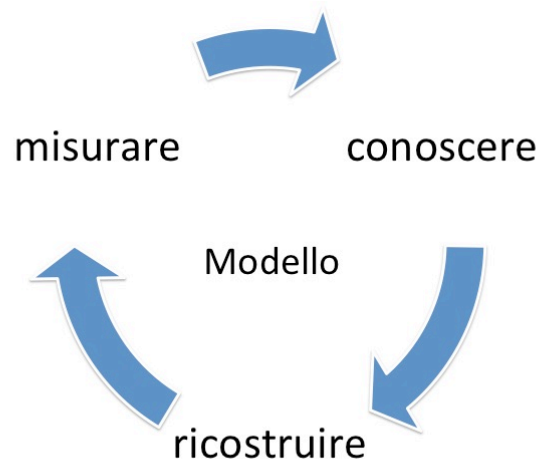


Figura 6; schema del processo ciclico alla base della costruzione del Modello.

capitolo 2 _ *Cultural Heritage Recording*: metodi integrati per la documentazione dei beni culturali.

«L'uomo è misura di tutte le cose: di quelle che sono in quanto sono, di quelle che non sono in quanto non sono».

(PROTAGORA)

2.1 La registrazione del patrimonio culturale

Le categorie delle quali ci si serve per classificare metodi e strumenti del rilievo architettonico sono solitamente due: rilievo diretto e rilievo indiretto. Della prima categoria fanno parte quelle operazioni di misura che consentono di conoscere il valore dimensionale di una distanza in tempo reale. Le misure vengono annotate su un disegno realizzato sul posto, comunemente denominato *eidotipo*. La redazione degli eidotipi è il momento cruciale del rilievo con metodi diretti: in questa fase l'operatore "legge" la struttura formale ed il linguaggio architettonico del manufatto, ne interpreta l'articolazione, le gerarchie e le geometrie sottese, e "decide" quali sono le misure utili a verificare le ipotesi interpretative e ad eseguirne la rappresentazione grafica. Il rilievo presuppone ovviamente la capacità dell'operatore di acquisire le misure in modo esatto, scegliendo volta per volta gli apparati strumentali idonei, ma presuppone soprattutto la capacità di avanzare delle ipotesi interpretative corrette, basate sulla conoscenza dei caratteri stilistici e costruttivi del manufatto e delle sue caratteristiche geometriche e morfologiche.

La seconda categoria, quella del rilievo indiretto, comprende i metodi topografici, fotogrammetrici e *laser scanning*. Il rilievo indiretto è così detto perché le dimensioni del manufatto non sono note nel momento in cui vengono eseguite le misurazioni, ma vengono calcolate a seguito di una fase di elaborazione.

Le metodologie sviluppate per la registrazione dell'esistente sono oggi prevalentemente orientate verso i sistemi *no-contact*³⁵. L'assenza di contatto fisico tra l'oggetto da misurare e il rilevatore, offre la possibilità di: a) misurare oggetti particolarmente fragili (reperti archeologici, opere d'arte), b) condurre campagne di rilievo a distanza (online measurements) o in ambienti particolarmente ostili per l'operatore, c) ridurre i tempi di acquisizione³⁶.

Il processo di registrazione del patrimonio culturale (*Cultural Heritage Recording*) si è sensibilmente evoluto, nel recente passato, grazie al considerevole progresso tecnologico nel settore informatico, allo sviluppo di sensori di nuova generazione e di hardware con elevate capacità computazionali. Algoritmi complessi e spazi di archiviazione virtualmente illimitati hanno permesso l'acquisizione di ricche documentazioni digitali del patrimonio architettonico e archeologico, agevolmente gestibili e condivisibili dagli addetti ai lavori.

Gli obiettivi perseguiti dagli studi di settore riguardano prevalentemente indagini conservative (analisi dei degradi strutturali e di superficie), documentazione, visualizzazione via web, fruizione turistica, sistemi per l'*edutainment*.

Uno dei più attivi esperti nel campo della documentazione dei beni culturali³⁷ ha osservato che, nonostante le potenzialità offerte da un settore in forte espansione (specie per la *fotogrammetria stereoscopica* e la *computer vision*, di cui si dirà in seguito) e l'impegno attivo delle organizzazioni internazionali per la tutela del patrimonio culturale, la principale difficoltà in tale settore rimane la codifica di una metodologia che implichi l'uso sistematico delle tecniche di acquisizione e modellazione 3D; la necessità di favorirne l'uso anche ai non addetti ai lavori fa sì che gli *output* tridimensionali vengano spesso ridotti a grafici bidimensionali, con conseguente perdita di informazioni. Recentemente la ricerca è stata orientata allo sviluppo di procedure automatizzate e *user-friendly*, che dovrebbero in breve tempo colmare il divario tra gli esperti di geomatica³⁸ e di grafica 3D e i soggetti coinvolti nella tutela del patrimonio culturale³⁹; un primo approccio riguarda la possibilità di semplificare il processo di acquisizione della misura, attraverso l'uso di

dati non strutturati e strumenti comunemente disponibili in commercio⁴⁰; un secondo approccio mira alla definizione di sistemi di riconoscimento automatico delle forme (*shape detection* e *shape reconstruction*) che consentano la lettura delle caratteristiche morfologiche del manufatto anche a operatori non specializzati. Al fine di garantire la condivisione dei database generati, nel corso degli anni è stata definita una *pipeline* procedurale di riferimento per il *Cultural Heritage Recording*, che si basa su una codifica metodologica⁴¹ articolata nelle seguenti fasi:

- Registrazione e organizzazione delle informazioni digitali (acquisizione dei dati).
- Gestione e catalogazione dei dati acquisiti (discretizzazione, misura e costruzione del modello).
- Diffusione degli esiti conseguiti.
- Condivisione delle informazioni acquisite per scopi di ricerca, conservativi, turistici.

Naturalmente tale codifica suggerisce le linee guida essenziali dell'intero processo, demandando alla sensibilità dell'operatore la scelta di strumenti e procedure.

La fase di acquisizione dei dati riguarda la registrazione delle coordinate tridimensionali della scena reale, che avviene solitamente tramite la produzione di un *simulacro* digitale della scena rilevata, sul quale vengono eseguite le operazioni di misura. La fase di discretizzazione consiste nell'individuazione delle parti che compongono il manufatto e delle matrici geometriche che ne regolano la morfologia; la produzione di elaborati grafici, così come la costruzione di modelli tridimensionali, viene condotta identificando gli elementi salienti del manufatto e definendone posizione e natura geometrica. La condivisione delle informazioni, che rende verificabili e replicabili gli esiti conseguiti, permette di validare i fondamenti scientifici dell'indagine.

Nel seguito la trattazione della sequenza di procedure offrirà lo spunto per avanzare una proposta di codifica metodologica per il *Cultural Heritage Recording* come esito delle esperienze condotte in questo studio. In questo capitolo sarà invece proposta una rassegna delle principali tecniche di acquisizione *no-contact* per la documentazione dei beni culturali, pur consapevoli che tale profilo non può che avere un carattere provvisorio, stante la costante evoluzione degli apparati strumentali e delle procedure che da oltre vent'anni procede incessante e con ritmo crescente.

2.2 Classificazione dei metodi *no-contact*

Il principale veicolo delle informazioni metriche nelle tecniche *no-contact* è la luce, catturata (metodi *image-based*) o emessa (metodi *range-based*) da idonea strumentazione e trasformata in informazione tridimensionale attraverso algoritmi o procedure geometriche. In letteratura la classificazione dei metodi di rilievo *no-contact* è determinata in ragione delle caratteristiche del sensore impiegato per l'acquisizione della misura: i sensori attivi, detti anche *range-based*, acquisiscono le coordinate tridimensionali di un punto attraverso l'emissione di un raggio elettromagnetico; alla categoria dei sensori passivi, *image-based*, appartengono le macchine fotografiche; dalle fotografie, acquisite con opportune procedure, è possibile desumere la forma di un oggetto o di una scena tridimensionale.

2.3 Metodi e strumenti *range-based*

Gli strumenti dotati di sensori attivi sono classificati in base alla distanza ammissibile fra il dispositivo emettitore del raggio e il punto da rilevare; tale distanza, in inglese *range*, determina la locuzione *range-based*⁴²; il principio di acquisizione della misura sfrutta l'emissione di un raggio elettromagnetico (luce visibile, infrarosso o altro), che, colpendo la superficie rilevata, consente allo strumento di ricavare una misura di distanza.

Uno tra i più diffusi strumenti a sensore attivo usato per la documentazione del patrimonio culturale è lo scanner laser, in grado di registrare con rapidità sorprendente un elevato numero di coordinate spaziali e organizzarle in un unico file digitale. La storia degli strumenti *laser scanning* è circoscritta a poco più di mezzo secolo; sebbene Albert Einstein avesse sperimentato già nel 1917 il modo per trasformare l'energia da una forma primaria in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di elevata intensità (luce laser), il brevetto del primo dispositivo laser venne depositato solo nel 1958 dai fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes⁴³; agli anni Sessanta del ventesimo secolo risalgono le prime applicazioni *laser scanning*, prevalentemente eseguite in ambito militare e scientifico. Lo sviluppo delle tecnologie laser e la sensibile riduzione del costo dei sensori elettro-ottici hanno permesso, tra gli anni Settanta e Ottanta, l'applicazione dei sistemi *range-based* anche nel settore industriale⁴⁴, per il controllo qualitativo e il monitoraggio della produzione. I sistemi che integrano moduli GPS e strumentazioni *laser scanning* installate su velivoli (*Airborne Laser Scanning – ALS*), sviluppati ancora una volta per scopi militari, troveranno impiego nel monitoraggio di vaste aree di territorio (scansioni delle masse terrestri, monitoraggio oceanografico e forestale). Solamente negli anni Novanta il rapido progresso informatico e la crescente diffusione dei *personal computer* hanno favorito l'avvio della commercializzazione di massa. Risale al 1994 la produzione del primo ALS per uso commerciale⁴⁵; qualche anno più tardi sarà avviata la commercializzazione del primo Laser Scanner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanning – TLS*)⁴⁶.

In letteratura i sistemi *ALS* e *TLS* sono classificati in categorie distinte, pur mantenendo gli stessi principi di acquisizione della misura; i sensori per applicazioni ALS, come già accennato, sono montati su piattaforme aeree, mentre i TLS sono collocati in posizione statica su treppiedi o su veicoli in moto a velocità controllata; al variare delle applicazioni varia anche la soglia di accuratezza⁴⁷.

La classificazione dei sensori attivi determinata in ragione della distanza (*range*)⁴⁸ consente di distinguere tra acquisitori a bassa, media e alta portata: gli strumenti dotati di bassa portata (*close-range*) sono capaci di rilevare oggetti a distanze non superiori a un metro e con risoluzioni di ordine sub-millimetrico; gli strumenti a media portata (*medium-range*) possono rilevare oggetti fino a una distanza di 300 metri dal sensore, con una risoluzione che varia da 1 a 10 millimetri; gli strumenti a lunga portata (*long-range*), infine, possono rilevare punti distanti fino a due o tre chilometri dal sensore, con una risoluzione variabile tra 5 e 10 centimetri. Naturalmente l'impiego di tali strumenti è strettamente legato al grado di accuratezza che il rilievo deve garantire. Si pensi, a titolo esemplificativo, ai rilievi per la documentazione di siti archeologici, la cui complessità richiede un approccio integrato e l'uso alternato di strumenti con portate distinte: la campagna di rilevamento è generalmente organizzata in più fasi, dal generale al particolare; l'acquisizione dell'intera area può essere eseguita con strumenti a media e alta portata, con un livello di dettaglio non elevato [fig. 7.a]. Il rilievo di dettaglio delle aree che all'interno del sito si contraddistinguono per prestigio (edifici pubblici o di culto, ambienti principali di un'abitazione) e interesse storico-artistico (presenza di frammenti e brani decorativi) verrà eseguito attraverso strumenti di media portata, capaci di risoluzioni millimetriche [fig. 7.b]. Infine, il rilievo di reperti archeologici (vasellame, suppellettili) o di apparati decorativi (mosaici, pavimentazioni, affreschi) richiederà l'utilizzo di strumenti *close-range*, capaci di acquisire con risoluzione sub-millimetrica eventuali quadri fessurativi e deformazioni impercettibili dall'occhio umano [fig. 7.c].

In base al principio di acquisizione della misura, i sensori attivi vengono classificati secondo due categorie: *scanner triangolatori* e *scanner distanziometrici*. Tra le due forme di classificazione finora elencate esiste

una relazione: gli scanner a bassa portata (*close-range*) sono scanner triangolatori, mentre gli scanner a media e lunga portata (*medium, long-range*) sono scanner distanziometrici.

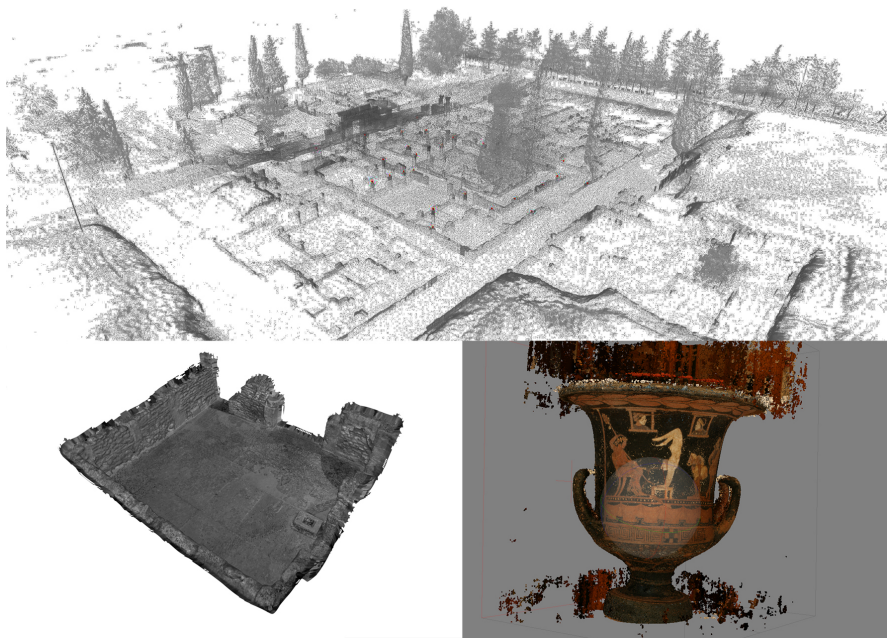
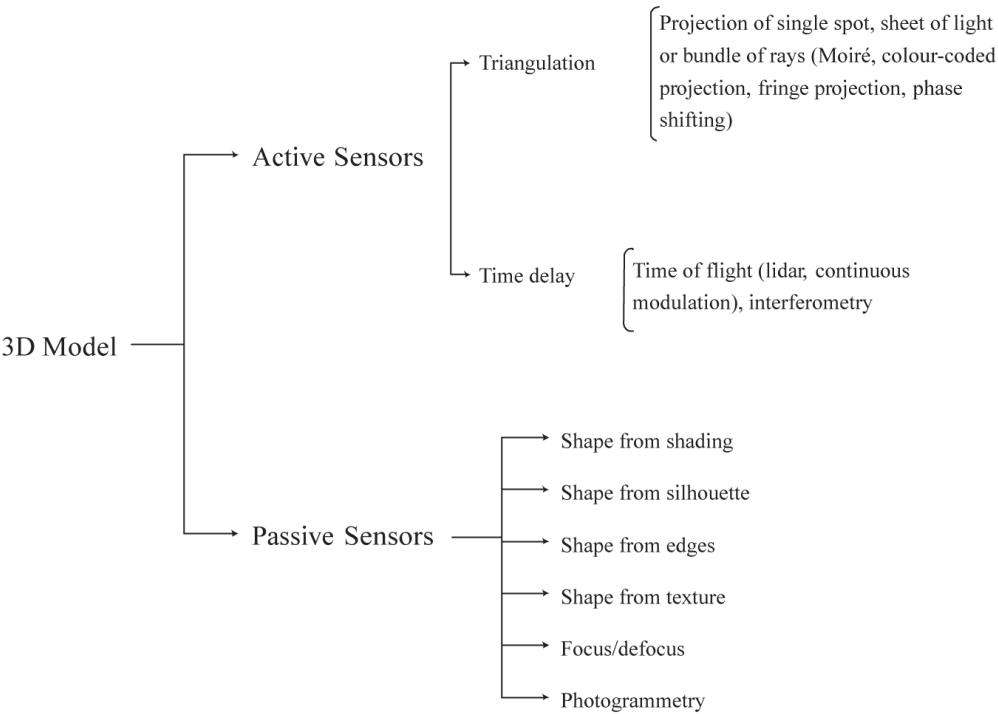


Figura 7; acquisizione dei resti del Quartiere Ellenistico di Agrigento: (a) rilievo dell’area archeologica; (b) acquisizione di uno degli ambienti di maggiore pregio; (c) rilievo di dettaglio di vasellame.

Tabella 1 - Classificazione dei metodi di rilievo in ragione dei sensori impiegati (REMONDINO, EL-HAKIM, 2006, op. cit., p. 2/0)



2.3.1 Scanner triangolatori

Gli scanner triangolatori sono dotati di un sensore di emissione e un sensore di acquisizione posti a distanza nota su supporti rigidi (l'intero sistema è noto come *scanner head*). Tali dispositivi sfruttano il principio dell'intersezione in avanti⁴⁹, secondo un metodo di calcolo già noto ai matematici greci e frequentemente usato nel corso dei secoli; lo scanner emette un raggio elettromagnetico (laser o luce) che viene riflesso e deviato verso un punto della superficie da rilevare attraverso uno specchio rotante; un sensore di acquisizione (CCD⁵⁰ per i primi scanner, CMOS⁵¹ per i più recenti) registra la posizione del punto di collisione sulla superficie; in tal modo è descritto un triangolo avente per lato noto la distanza d tra i due sensori e per lati incogniti la distanza percorsa dal raggio in andata e ritorno [fig. 8.a].

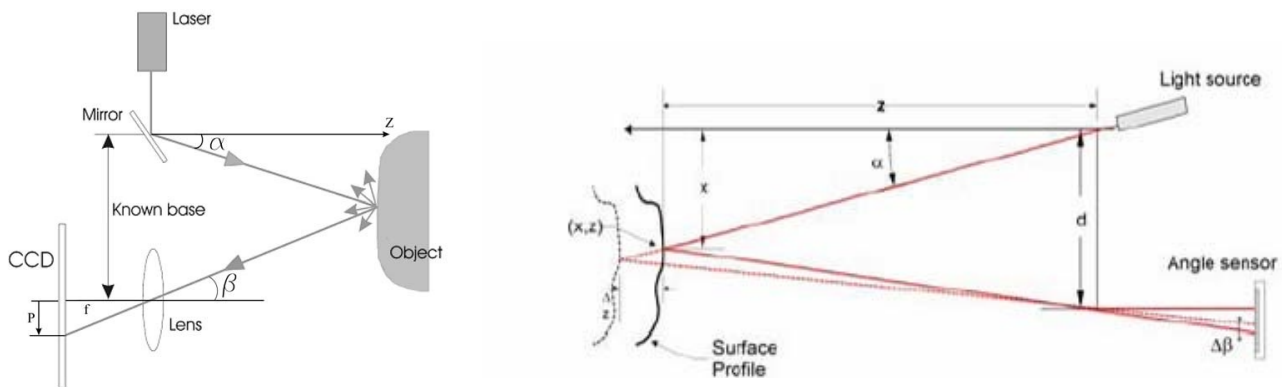


Figura 8; Schema di funzionamento dei laser scanner a triangolazione; (b) Principio di misura della distanza in funzione della variazione dell'angolo β ; (GIRELLI 2007, op. cit., pp. 49-50).

La determinazione della distanza ridotta z avviene attraverso la risoluzione del suddetto triangolo; applicando i teoremi di Talete e conoscendo l'ampiezza dei due angoli (α, β), vale l'equazione

$$z = \frac{d \cdot \cot \alpha \cdot \tan \beta}{\tan \beta + \cot \alpha}$$

L'angolo α viene misurato direttamente dallo strumento, mentre l'angolo β è ricavato indirettamente attraverso la conoscenza della distanza P (distanza misurata sul sensore di acquisizione) e della lunghezza focale f (specifiche dello strumento), pertanto si ha

$$\beta = \arctan \frac{f}{P}$$

Supponendo di allontanare lo scanner dalla superficie rilevata avendo cura di mantenere inalterato l'angolo α , la nuova distanza z' è ricavata dalla variazione dell'angolo β ($\Delta\beta$) [fig. 8.b].

Appare evidente che, al fine di ottenere misurazioni prive di errori sensibili, la distanza z debba mantenere pressappoco lo stesso ordine di grandezza della distanza d , aspetto che rende gli scanner triangolatori particolarmente adatti ad applicazioni *close-range*, come il rilievo di reperti archeologici e apparati decorativi, o al controllo qualitativo della produzione industriale (*surface control*) nei settori dell'oggettistica, della meccanica e dell'automobilismo.

Negli anni, in tali strumenti sono stati implementati efficaci sistemi di controllo riguardanti l'accuratezza della misura (sistema a doppia camera, sistema a doppia apertura o *Bi-Iris*); una portata nominale più ampia,

la sovrabbondanza delle misure (assottigliamento della soglia di errore) e la riduzione delle interferenze luminose (luce solare o artificiale)⁵² sono alcuni tra i principali vantaggi ottenuti.

Il principio della triangolazione è impiegato sia da scanner a raggi laser, sia da dispositivi denominati *surface digitalizers*, che emettono fasci di luce codificati; in base al tipo di radiazione luminosa emessa si distinguono quindi *Single Spot Scanners* [fig. 9.a], *Slit Scanners* [fig. 9.b] e *Structured Light Scanners* [fig. 9.c].

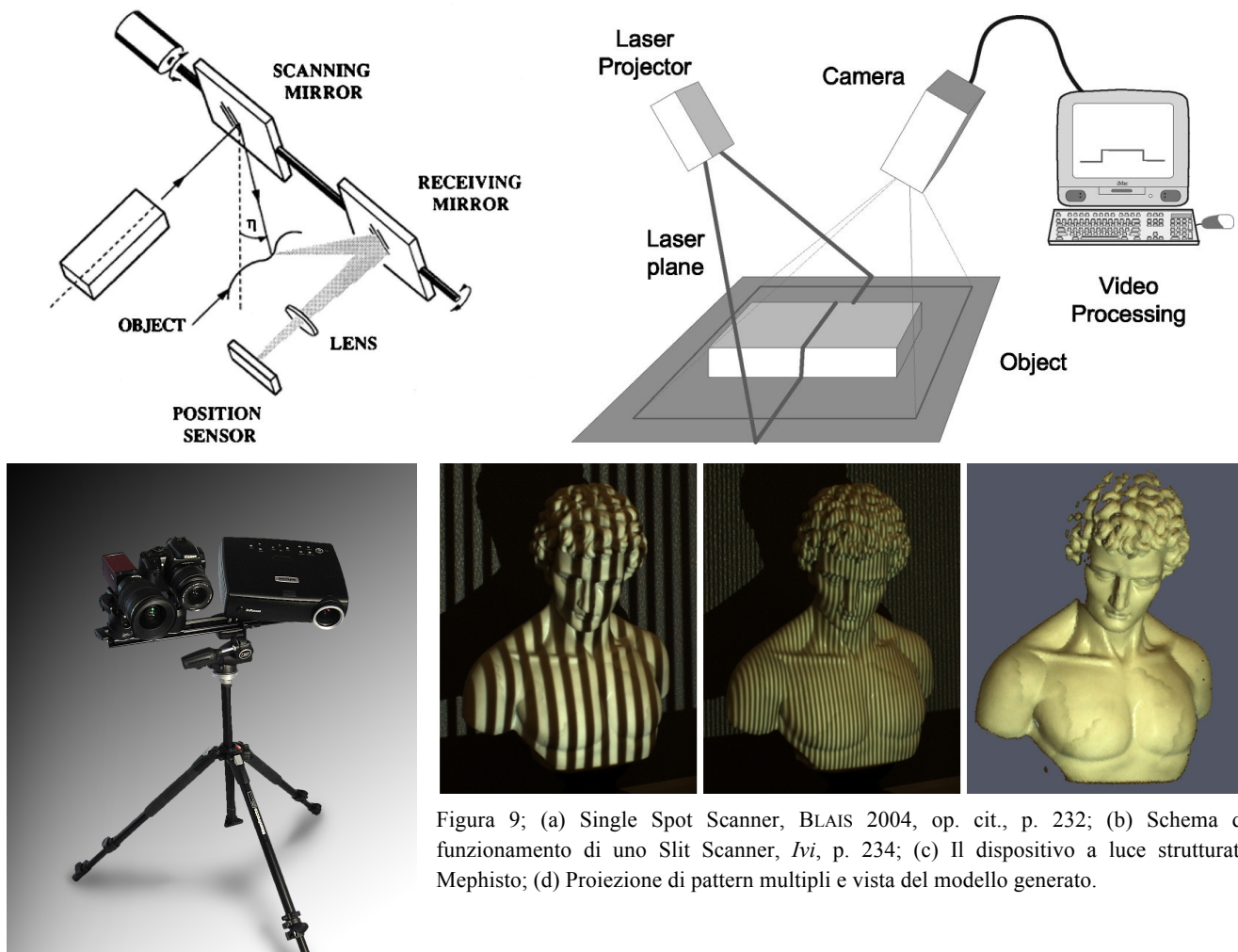


Figura 9; (a) Single Spot Scanner, BLAIS 2004, op. cit., p. 232; (b) Schema di funzionamento di uno Slit Scanner, Ivi, p. 234; (c) Il dispositivo a luce strutturata Mephisto; (d) Proiezione di pattern multipli e vista del modello generato.

Alcuni scanner eseguono la misura attraverso l'emissione di luce laser puntiforme o lineare; i primi sono meglio noti come Single Spot Scanners; in questo caso l'acquisizione avviene registrando la coordinata di distanza punto per punto, così come descritto in precedenza; i secondi sono noti come Slit Scanners e proiettano un piano luminoso (*laser sheet*) che, intersecando la superficie da rilevare, genera il profilo dell'oggetto; la deformazione prodotta dalla linea laser sull'oggetto è funzione diretta della distanza; tali strumenti sono maggiormente diffusi grazie alla rapidità di acquisizione.

I dispositivi a luce strutturata (*Structured Light Scanners*) differiscono dai modelli appena elencati per il tipo di radiazione luminosa emessa; lo strumento proietta sulla superficie un fascio di luce comunemente noto come pattern⁵³. Anche in questi dispositivi la deformazione del pattern è funzione della geometria della superficie e della distanza rilevata [fig. 9.d].

La principale difficoltà riscontrata da tali dispositivi è il riconoscimento di punti distinti, illuminati dalla medesima fascia di luce codificata; al fine di garantire tale indicizzazione sono stati sviluppati diversi criteri di proiezione⁵⁴, tra cui la proiezione di griglie a maglia quadrata, di strisce verticali-orizzontali di diversa ampiezza, di pattern Red, Green, Blue; in tal modo la posizione di un singolo punto è registrata in maniera

ridondante usando pattern distinti; il colore, infine, viene desunto da prese fotografiche acquisite da una camera digitale sincronizzata con il sistema di scansione. Il basso costo dei sensori impiegati nei *digitalizers* (proiettori, camere fotografiche e telecamere firewire) ne ha permesso la rapida diffusione.

Seppur con un impiego limitato al rilievo di oggettistica ed elementi di dettaglio, negli anni, tali sensori sono stati integrati in dispositivi dalle diverse configurazioni [fig. 10]: a. scanner su treppiede per il rilievo di grandi oggetti o piccoli ambienti; b. dispositivi da tavolo dotati di piatto rotante per la digitalizzazione di oggetti di medie dimensioni a geometria semplice⁵⁵; c. unità *hand-held* per oggetti di medie e piccole dimensioni, le cui complessità geometriche richiedano elevati gradi di flessibilità.



Figura 10; (a) scanner su treppiede Minolta VIVID; (b) unità desktop (www.makerbot.com); (c) unità *hand-held* (www.creaform3d.com).

2.3.2 Scanner distanziometrici

La registrazione della distanza percorsa da un raggio laser può basarsi sulla conoscenza delle caratteristiche fisiche dell'impulso e del tempo impiegato per raggiungere la distanza desiderata. È noto che la luce laser sia descrivibile come un impulso luminoso monocromatico e monodirezionale con frequenza costante (quindi a velocità costante), assimilabile a un raggio sinusoidale di passo regolare; gli strumenti distanziometrici sfruttano tali caratteristiche intrinseche del raggio laser per misurare la distanza. La misura di un punto avviene, come negli strumenti topografici (stazioni totali), registrandone le coordinate polari: angolo azimutale, angolo zenitale, distanza inclinata [fig. 11]. Per tale motivo gli scanner distanziometrici sono spesso classificati in letteratura come *stazioni totali ad alta automazione*⁵⁶.

In ragione del metodo con cui viene misurata dallo strumento la distanza percorsa dal raggio laser, si distinguono scanner a tempo di volo (*Time-of-Flight scanners - ToF*) e scanner a modulazione di fase (*phase shift scanners*).

Gli scanner *ToF* misurano il tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione del raggio laser riflesso dalla superficie scandita; per tale motivo su tali strumenti sono integrati orologi atomici di altissima precisione e, in alcuni modelli più complessi, la

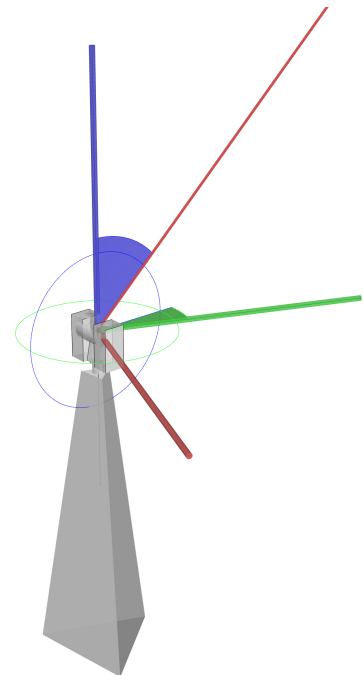


Figura 11; coordinate polari acquisite da uno scanner.

misura del tempo è controllata attraverso metodi di verifica analitici⁵⁷; nota la velocità (v) dell'impulso laser, la misura della distanza percorsa ($2d$) è ricavata attraverso note equazioni espresse in funzione del tempo registrato (Δt)

$$2d = v \cdot \Delta t$$

Il metodo del tempo di volo trova le sue prime applicazioni *laser scanning* su piattaforme *Airborne*, impiegate prevalentemente durante operazioni militari e in sistemi satellitari (*Satellite Laser Ranging*) per il monitoraggio di vaste aree di territorio; la potenza dell'impulso, che ne garantiva inizialmente l'uso esclusivo ad alta quota, è stata in seguito rimodulata per l'impiego civile. Uno dei limiti non ancora superati riguarda la difficoltà nell'acquisire superfici riflettenti, a causa del cosiddetto *rumore*, un disturbo che si verifica a causa della deviazione che il raggio laser subisce colpendo la superficie riflettente.

Il metodo della *differenza di fase* si basa sulla registrazione dell'onda sinusoidale di cui è composto il raggio laser [fig. 12]; noto il passo del raggio (*fase*), un sensore di acquisizione, o *discriminatore di fase*, registra lo *sfasamento* che produce l'onda elettromagnetica dopo essere stata riflessa dalla superficie scandita; la distanza è calcolabile in ragione di tale differenza di fase ed è espressa secondo due distinte variabili: lo *sfasamento* $\Delta\phi$, che esprime la differenza tra fase finale e fase iniziale, e l'*ambiguità* n , che esprime il numero intero di fasi (o onde) emesse dallo strumento.

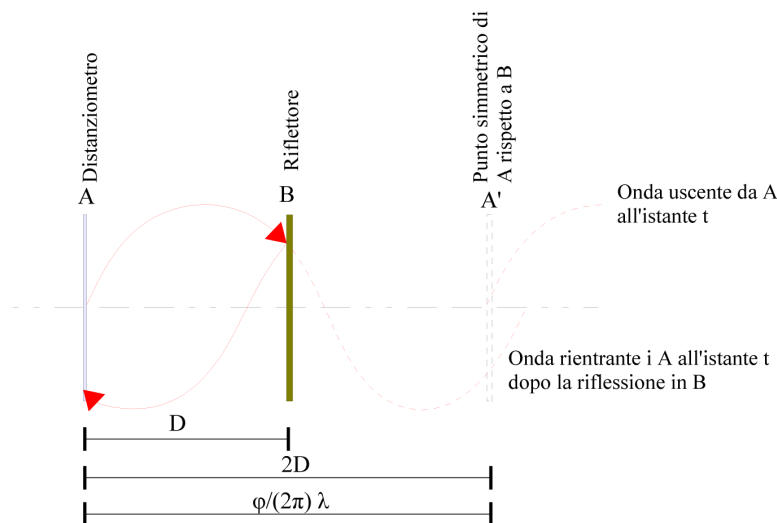


Figura 12; principio di acquisizione della misura per differenza di fase (BORNAZ 2004, op. cit., p. 14).

2.3.3 Pre-processing dei dati laser scanning

Dalla commercializzazione del primo strumento *laser scanning* a oggi lo sviluppo tecnologico ha prodotto considerevoli miglioramenti in termini di rapidità, accuratezza e manovrabilità dei dispositivi; i voluminosi scanner prodotti negli anni Novanta sono stati sostituiti da dispositivi compatti e maneggevoli, auto-alimentati, dotati di memoria di archiviazione interna e controllabili in remoto. Tale processo di innovazione ha determinato una progressiva riduzione dei costi di produzione e, conseguentemente, una maggiore diffusione sul mercato. Un'interessante catalogazione basata sull'innovazione tecnologica dei dispositivi *laser scanning* è proposta da Rudolf Staiger⁵⁸.

Fatta eccezione per alcuni sistemi *close-range*, gran parte degli scanner consente la proiezione del raggio laser in tutte le direzioni della scena reale attraverso la rotazione di alcune componenti [fig. 13]. In tal modo,

l'area che lo scanner è in grado di coprire è assimilabile a una porzione di sfera costituita da una rete di punti equidistanti; il centro della sfera coincide con il centro dello strumento e il raggio corrisponde alla direzione assunta dal laser. L'*output* restituito dagli strumenti a sensori attivi è un insieme cospicuo di punti, comunemente denominato nuvola (*point cloud*), ovvero una superficie a maglia triangolare, denominata *mesh*. Tali elaborati consentono all'operatore di visualizzare simultaneamente su un computer l'insieme delle registrazioni eseguite, in una copia tridimensionale del manufatto reale. Il livello di dettaglio di tale oggetto digitale, che è definito dalla densità della nuvola (ossia dalla quantità di punti registrati per una data porzione di superficie), può essere determinato, in fase di acquisizione, fissando il passo di registrazione.

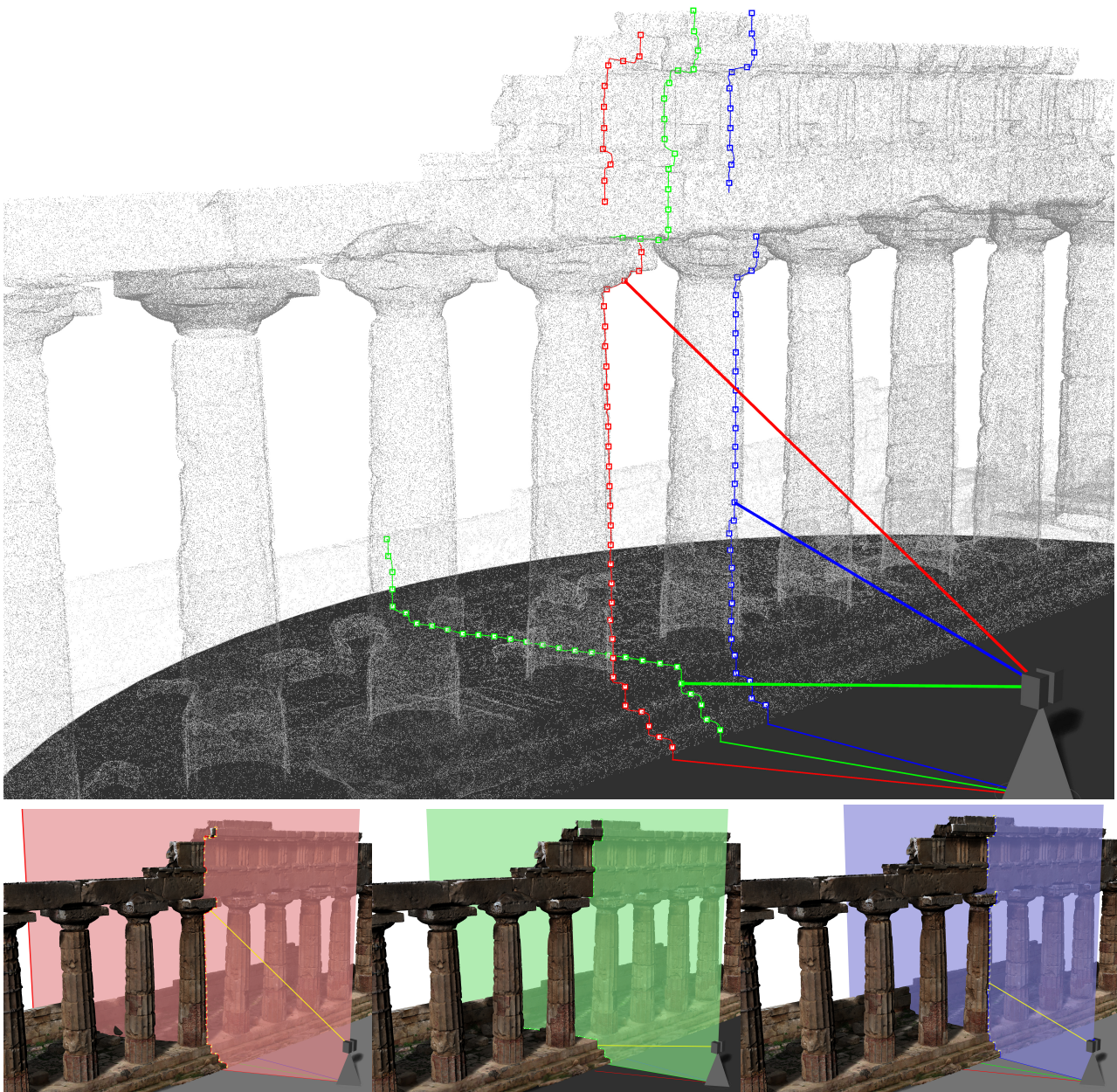


Figura 13; schema di funzionamento di uno scanner laser.

La morfologia della scena digitalizzata è direttamente leggibile senza alcun bisogno di processare i dati acquisiti. La nuvola di punti viene memorizzata in un unico file nel quale per ogni punto sono registrate tre coordinate spaziali (x, y, z), tre valori cromatici (Red, Green, Blue) e il valore di riflettanza.

I valori RGB vengono desunti da immagini fotografiche acquisite da camere integrate allo scanner o, nel caso in cui lo scanner non sia dotato di camera interna, da camere esterne posizionate su un braccio

meccanico che viene collocato sul treppiede immediatamente dopo la rimozione dello scanner; il braccio posiziona l'obiettivo nel punto di emissione del raggio laser. Le immagini sferiche acquisite con tale modalità vengono utilizzate, attraverso un processo automatico, per conferire qualità cromatiche alla nuvola di punti⁵⁹.

La riflettanza è un dato caratteristico dei rilievi con laser scanner, che corrisponde all'intensità di rientro del segnale emesso; tale valore, tradotto per la visualizzazione in toni di grigio compresi tra il bianco e il nero, è condizionato – a parità di distanza fra punto rilevato e punto di emissione del segnale – dalla grana della superficie investita dal raggio, dalla sua caratterizzazione cromatica e dalla sua lucentezza [fig. 14].

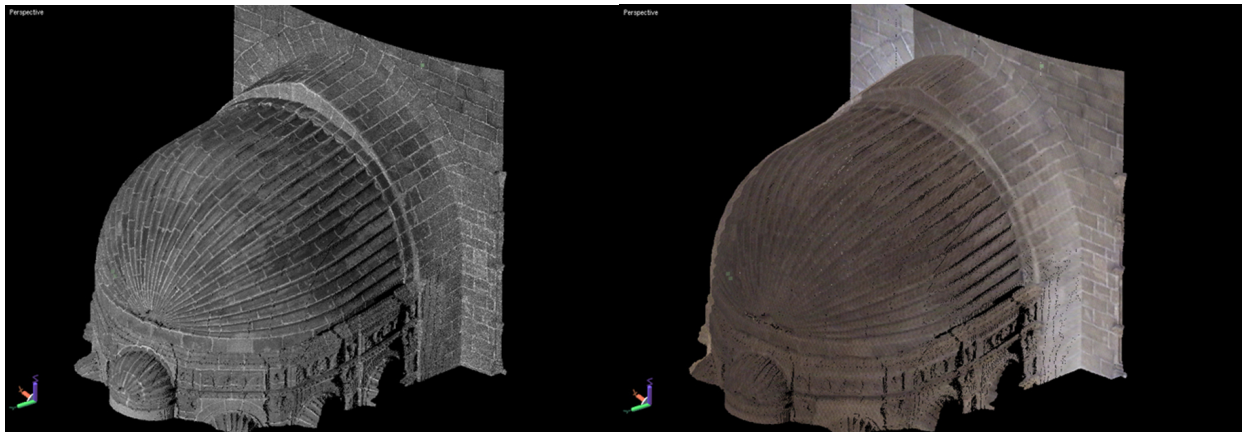


Figura 14; Trapani, Cappella dei marinai, visualizzazione della riflettanza e dei valori RGB di una nuvola di punti.

La riflettanza non è condizionata dalle condizioni di luce ambientali, né dalla risoluzione della camera fotografica; il valore di riflettanza viene registrato anche quando una scansione viene eseguita al buio. Tale valore è di particolare importanza quando nell'opera siano presenti discontinuità materiche di particolare rilevanza. A solo titolo esemplificativo, si faccia riferimento ai manufatti in pietra da taglio, per i quali la lettura in toni di grigio del valore di riflettanza di conci in pietra e giunti assume un ruolo determinante per lo studio della stereotomia, permettendo di individuare l'esatta geometria dell'apparecchio murario, e risalire quindi alle tecniche di taglio dei conci e alla loro corretta disposizione.

Per il rilievo di edifici complessi è spesso necessario acquisire parti del manufatto da punti di stazione distinti. In tal modo vengono registrate più scansioni, che sarà necessario collegare tra loro in seguito. Per far sì che tale processo avvenga con il minimo scarto d'errore, possono essere disposti target nella scena da acquisire, in numero pari o superiore a tre e visibili da più stazioni.

La fase di elaborazione dei dati conduce sostanzialmente all'*unione* (procedura nota come registrazione delle nuvole o mosaicatura) delle scansioni acquisite dai diversi punti di stazione, avendo cura di rimuovere preliminarmente i punti appartenenti a oggetti estranei all'opera presenti durante il processo di scansione (elementi di arredo urbano, veicoli, etc.). Il principio alla base della registrazione prevede che la posizione di una delle due nuvole sia vincolata, mentre alla seconda sia applicata una rototraslazione rigida. L'individuazione della posizione corretta avviene attraverso un algoritmo, denominato *Iterative Closest Point* (ICP)⁶⁰, che procede in modo iterativo alla sovrapposizione delle due nuvole, sino a determinare i vettori di rototraslazione più idonei. I metodi impiegati per la sovrapposizione sono comunemente noti come sovrapposizione punto-punto⁶¹ e punto-piano⁶²; in entrambi i casi la registrazione avviene tramite la ricerca del minimo di una funzione obiettivo. L'algoritmo ICP nella sua formulazione originaria è *pairwise based*, ossia consente la registrazione di due nuvole per volta. Nei principali software è stata integrata la possibilità di ottimizzare le sovrapposizioni al termine dell'intero processo, ridistribuendo e riducendo l'errore.

Una valida alternativa a tali procedure di orientamento è il metodo noto come *3D Least Square Matching*, che stima i parametri della trasformazione spaziale fra due o più *patches* tridimensionali, minimizzando la distanza fra le superfici per mezzo del metodo dei *minimi quadrati*⁶³.

Sotto il profilo operativo, la registrazione avviene generalmente attraverso l'uso di un software dedicato, individuando nella prima nuvola le posizioni di almeno tre target visibili, che vengono contrassegnati con un indicatore, e procedendo all'individuazione degli stessi target nelle scansioni successive; in tal modo si descrive un sistema di tre distanze reciproche tra i target selezionati, che permette l'orientamento delle due scansioni processate. Proseguendo analogamente con le altre nuvole è possibile orientare le singole acquisizioni secondo un unico sistema di riferimento. Al termine del processo di registrazione il software consente di valutare lo scarto nella sovrapposizione delle nuvole.

Un metodo alternativo conduce alla registrazione delle scansioni attraverso il riconoscimento di punti omologhi su nuvole distinte; a differenza dell'orientamento con target – in cui l'individuazione del punto centrale di ognuno di essi avviene con minime soglie di errore – la registrazione per punti omologhi può avvenire con margini d'errore più elevati. I fattori che possono condizionare tale processo sono essenzialmente tre: il passo della scansione; la quantità e la qualità dei punti significativi individuati dall'operatore; la loro distanza reciproca.

Riguardo al passo delle scansioni, appare evidente che, anche a parità di risoluzione e di distanza dallo scanner, non sarebbe comunque possibile individuare il medesimo punto nelle distinte scansioni della superficie a causa degli impercettibili slittamenti tra le due reti di punti che costituiscono le nuvole.

Per tale ragione la scelta dei punti omologhi deve essere compiuta valutando quali e quanti punti significativi selezionare nelle scansioni. Anche per la registrazione per punti omologhi sarebbe sufficiente l'individuazione di tre punti; tuttavia individuarne un numero maggiore, consente di affinare il processo di calcolo delle mutue distanze, giungere per successive approssimazioni ad una migliore determinazione dei punti selezionati e pertanto ad una migliore interpolazione delle nuvole.

La distanza tra i punti prescelti influisce in modo inverso sulla correlazione, nel senso che, scegliendo tre punti omologhi posti agli antipodi della nuvola l'errore commesso nel processo di stima delle distanze sarà inferiore rispetto a quello commesso scegliendo tre punti prossimi. Al termine del processo di orientamento il software consente di ottimizzare l'allineamento complessivo tra le nuvole attraverso una procedura automatica, comunemente nota come *refinement*.

Molti dei software di modellazione oggi in commercio sono dotati di componenti che consentono la visualizzazione di nuvole di punti, la misura delle distanze tra punti e l'estrazione di sezioni piane. In questo caso i comandi per l'interrogazione della nuvola sostituiscono le procedure di misura tradizionali; le nuvole vengono così utilizzate per la produzione di elaborati grafici convenzionali (piante, sezioni, prospetti).

2.4 Metodi e strumenti *image-based*

Le tecniche fondate sull'impiego di sensori passivi⁶⁴, comunemente denominate *image-based*, sfruttano immagini fotografiche per la ricostruzione di scenari tridimensionali; in gran parte dei casi, tali procedure utilizzano fotografie distinte di un medesimo oggetto, acquisite da differenti punti di vista; la produzione del dato metrico avviene attraverso procedure di matrice geometrica o basate su principi proiettivi. Recenti tentativi di restituzione della scena tridimensionale sono stati condotti, pur con alcuni limiti, sfruttando anche immagini singole⁶⁵ [fig. 15]. I metodi fotogrammetrici tradizionali consentono la trasformazione delle immagini fotografiche da proiezioni centrali (prospettive) a proiezioni parallele (prospetti, piante, etc.); essi generano immagini “raddrizzate” secondo un piano di riferimento (fotopiani) o in modo differenziale, tenendo conto della posizione spaziale dei pixel (ortofotopiani); sulle immagini così prodotte è possibile eseguire misurazioni o disegni. Nei processi di elaborazione vengono solitamente eseguite le misure di un limitato numero di punti utili a riferire tutti gli elementi rilevati sulle foto ad una stessa terna cartesiana. Con opportune dotazioni *hardware* è altresì possibile utilizzare modelli stereoscopici (del tutto simili a quelli introdotti nella tecnica cinematografica) da coppie o strisciate di immagini, ed eseguire le misurazioni in uno spazio tridimensionale virtuale.

Le tecniche basate sui sensori passivi, i cui punti di forza sono i bassi costi e la facilità di trasporto delle apparecchiature, hanno trovato ampia applicazione nella documentazione dei beni culturali. L'avvento della fotografia digitale e la disponibilità di dispositivi ottici calibrati a basso costo (camere metriche e scanner fotografici) ha accelerato tale diffusione, mentre l'evoluzione tecnologica ed informatica ne ha recentemente ampliato il campo d'azione.

Uno dei limiti delle tecniche fotogrammetriche tradizionali risiedeva nella necessità di procedere manualmente all'orientamento delle immagini; le più recenti ed interessanti evoluzioni nel campo del rilevamento fotogrammetrico, che sembrava condannato ad una condizione di marginalità a seguito della diffusione dei laser scanner, riguardano lo sviluppo di algoritmi che hanno consentito di automatizzare le procedure di calibrazione e orientamento delle immagini. Tali algoritmi, sviluppati nel campo della *computer vision*⁶⁶, hanno contribuito alla definizione di nuove tecniche fotogrammetriche, in grado di competere o integrarsi validamente alle procedure di rilevamento a sensori attivi.



Figura 15; ricostruzione di scene tridimensionali da singola immagine: (a), (b) EL-HAKIM 2001; (c) ZHANG et al. 2002.

2.4.1 La fotogrammetria: cenni storici

Nel 1958 il governo sovietico restituisce alla neonata Repubblica Democratica Tedesca il contenuto di 935 casse di legno, trafugate durante l'invasione russa nella Seconda Guerra Mondiale; il prezioso contenuto di quelle casse, attualmente custodito presso il *Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege*⁶⁷ di Waldstadt (trenta chilometri a sud di Berlino), era una raccolta di circa ventimila fotografie d'epoca raffiguranti prevalentemente architetture tedesche⁶⁸. La necessità di costituire una così vasta collezione di immagini, oggi nota con il nome di *Meydenbauer Archiv*, nasce da una visionaria idea di Albrecht Meydenbauer⁶⁹, architetto tedesco vissuto circa un secolo prima.

Nel 1858, dopo aver rischiato di precipitare da una torre della Cattedrale di Wetzlar di cui stava conducendo i rilievi, Meydenbauer avvia lo sviluppo di nuovi metodi di acquisizione basati sull'uso della fotografia per misurare oggetti distanti o non accessibili. Tale metodo è per la prima volta definito, nel 1867, con il termine tedesco *Photogrammetrie* in un'anonima pubblicazione, in seguito attribuita allo stesso Meydenbauer⁷⁰; il problema alla base di tale procedura risiede nell'associare la camera fotografica e gli strumenti di misura in un unico sistema integrato, in grado di permettere il dimensionamento degli oggetti raffigurati. Essendo nota la perfetta analogia fra immagini su pellicola e proiezione prospettica su quadro piano, tali strumenti fotogrammetrici assicurano la determinazione dei parametri di *orientamento interno* dell'immagine fotografica, ossia degli elementi fondamentali della prospettiva:

- piano di proiezione dell'immagine (quadro della prospettiva), identificato attraverso un supporto su cui era posta la lastra di vetro per l'impressione dell'immagine;
- lunghezza focale (distanza fra quadro e centro di proiezione) imposta come costante per il processo di restituzione fotogrammetrica;
- il controllo del piano orizzontale dello strumento e dell'orientamento verticale del quadro attraverso l'uso di un treppiede (giacitura del quadro).

I primi tentativi di rilievo fotogrammetrico vennero condotti esclusivamente su fotografie a quadro verticale al fine di limitare le variabili imposte nel processo di restituzione. A causa del ridotto angolo di presa di cui erano capaci le comuni macchine fotografiche dell'epoca, Meydenbauer avvia la sperimentazione impiegando lenti grandangolari e costruendo i primi prototipi di macchine metriche [fig. 16].



Figura 16; (sinistra) la prima camera metrica sviluppata da Meydenbauer; (destra) un modello portatile sviluppato dopo il 1909 (ALBERZ 2001).

Nell'estate 1867 il governo prussiano sponsorizza una dimostrazione delle nuove tecniche fotogrammetriche sviluppate dal giovane architetto tedesco; la campagna di rilievo, che interessa la località di Freyburg-on-Unstrut e le sue adiacenze, è condotta a scala urbana, attraverso la restituzione del tessuto cittadino, e a scala architettonica, attraverso la restituzione della chiesa di Freyburg. Durante la fase di acquisizione, durata poco più di tre giorni, furono acquisite ventuno fotografie del tessuto urbano e nove fotografie della chiesa; un tecnico indipendente, sotto la supervisione di un ufficiale militare e dello stesso Meydenbauer, avvierà in un ufficio di Berlino la restituzione fotogrammetrica. Gli esiti di tale campagna saranno pubblicati un anno dopo nel *Archiv für die Offiziere der Königlich Preussischen Artillerie- und Ingenieur-Korps*⁷¹.

In poco più di un ventennio la sperimentazione sulle tecniche di rilevamento e l'innovazione tecnologica nel settore delle camere fotografiche condussero alla costruzione di strumenti più raffinati e precisi, all'introduzione di lenti con molteplici distanze focali⁷² e alla possibilità di restituire anche immagini a quadro inclinato.

La celebre *Bauakademie* di Berlino, opera di Karl Friedrich Schinkel, che ospitava fin dagli anni Trenta dell'Ottocento la Scuola di Architettura berlinese, divenne nel 1885 la prima sede del *Königlich Preussische Meßbildanstalt*⁷³, primo istituto di fotogrammetria al mondo, di cui Meydenbauer fu nominato responsabile; dall'85 al 1909 (anno del suo pubblico ritiro) e in seguito fino al 1920, Meydenbauer e il suo staff perfezionarono ulteriormente strumenti e metodologie di rilievo, accumulando una notevole mole di fotografie utili alla documentazione del patrimonio architettonico tedesco.

Il metodo di restituzione fotogrammetrica approntato da Meydenbauer, basato su consolidati principi di geometria descrittiva, era articolato su due distinti approcci; il primo faceva uso dei punti di fuga (preferibilmente di rette orizzontali), che, tracciati sulla fotografia, permetteva di risalire all'orientamento interno della camera; il secondo, meglio noto come *Plane-table Photogrammetry*, sfruttava il principio del riconoscimento di punti omologhi su fotografie corrispondenti. Entrambi i metodi hanno rivoluzionato il settore della fotogrammetria moderna: il primo metodo trova tuttora largo impiego nelle procedure di restituzione prospettica grazie alle relazioni proiettive che si possono stabilire tra rette e loro proiezioni prospettiche⁷⁴; la fotogrammetria sferica, nella sua recente formulazione algoritmica, è basata prevalentemente sul riconoscimento automatico di coppie di punti omologhi in fotografie distinte.

Inizialmente il lavoro di Meydenbauer non riscosse alcun successo; per alcuni decenni la comunità scientifica si limiterà ad ignorare tali tecniche non ritenendole dotate di sufficiente attendibilità; solo in seguito le tecniche fotogrammetriche si diffonderanno in tutta Europa grazie all'attività di geografi e ingegneri militari.

A partire da questi principi, il vero progresso in fotogrammetria si manifesterà all'inizio del XX secolo con quello che Jean-Paul Saint-Aubin definirà come “le mariage mécanique de la photogrammétrie et de la stéréoscopie”, il matrimonio meccanico della fotogrammetria e della stereoscopia, cioè quando l'austriaco Von Orel costruisce il primo “restitutore” analogico che permette di determinare la dimensione e la forma dell'oggetto due volte fotografato. Grazie all'osservazione stereoscopica di due fotografie, questo apparecchio permette di misurare, direttamente nello spazio, la posizione di un punto di riferimento.⁷⁵

Di recente la fotogrammetria è stata rivoluzionata dall'innovazione tecnologica e informatica che ha investito quasi tutti i sistemi di misura; i processi di correlazione e individuazione dei punti omologhi sono stati automatizzati, consentendo sempre più rapide acquisizioni digitali della realtà.

2.4.2 Principi di fotogrammetria

Sin dalla sua invenzione, avvenuta nel 1839 per merito di Niépce, Daguerre e Talbot, la fotografia è considerata un valido strumento di registrazione della realtà, grazie alla capacità di raffigurare uno scenario reale (tridimensionale) su un supporto bidimensionale. Alcuni anni più tardi, come detto, tale capacità di documentazione fornirà lo spunto per considerazioni di tipo geometrico, basate sulle seguenti analogie tra fotografia e proiezione prospettica:

1. le rette proiettanti della prospettiva sono equivalenti ai raggi luminosi che imprimono l'immagine sulla pellicola;
2. il centro di proiezione da cui passano le rette proiettanti corrisponde al centro nodale dell'obiettivo fotografico;
3. il quadro corrisponde al piano della pellicola o di formazione dell'immagine;
4. la distanza principale, ossia la distanza del centro di proiezione dal quadro, coincide con la distanza focale dell'obiettivo⁷⁶.

Le procedure che permettono di rintracciare le relazioni proiettive tra una scena prospettica e gli oggetti da essa raffigurati erano già note alla metà del secolo XVIII, quando il fisico matematico Jean-Henri Lambert aveva formulato un metodo per risalire alla posizione dell'osservatore e della linea d'orizzonte, riuscendo così a *stimare l'orientamento degli oggetti contenuti in una prospettiva*⁷⁷.

La geometria proiettiva sarà formalizzata dal trattato di Jean Victor Poncelet nel 1822⁷⁸; tuttavia l'intuizione di Lambert detterà i presupposti per l'invenzione della fotogrammetria, il cui principio di funzionamento è efficacemente sintetizzato da Livio De Luca:

[...] su di una fotografia, la scena tridimensionale è proiettata in prospettiva su di un piano a due dimensioni. Di conseguenza, un qualsiasi punto dell'oggetto fotografato, indipendentemente dalla sua posizione nello spazio, sarà sempre e comunque posizionato lungo il raggio che partendo dal centro ottico della macchina fotografica si prolunga all'infinito.

Tuttavia, se lo stesso oggetto è visibile su due fotografie distinte, questo punto si troverà allora sull'intersezione dei due raggi corrispondenti. Questo procedimento – conosciuto con il nome di triangolazione – permette, a partire da due foto (di posizione e orientamento relativi conosciuti), di ritrovare un qualsiasi punto nello spazio, a condizione che questo sia presente in entrambe le fotografie.⁷⁹

È evidente che il presupposto legato al buon esito della triangolazione sia la conoscenza dell'esatta posizione del centro ottico di ogni fotografia, da cui avviene la proiezione sul quadro (o fotogramma) di ciascun punto restituito. Il processo di restituzione fotogrammetrica prevede le seguenti fasi operative⁸⁰:

- calibrazione del sensore;
- orientamento delle immagini;
- misura dei punti significativi sull'immagine;
- restituzione del modello tridimensionale;
- procedure di *mapping*;

Alla base della restituzione è il processo di acquisizione delle immagini, che avviene in ragione della scala e dell'obiettivo del rilievo. La letteratura distingue due distinti settori operativi: la fotogrammetria aerea, che si occupa prevalentemente di restituzioni cartografiche a larga scala, e la fotogrammetria terrestre (*close-range*), prevalentemente dedicata ad applicazioni terrestri. Recentemente lo sviluppo di velivoli radiocomandati, noti con l'acronimo *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicles*), ha esteso il dominio della fotogrammetria *close-range* anche alle prese eseguite a breve distanza da velivolo.

Al fine di derivare informazioni metriche tridimensionali dalle viste dell'oggetto rilevato è necessario stabilire una relazione geometrica (metodo grafico) o analitica tra il centro di proiezione (V), la collocazione spaziale del punto da acquisire $[P(x,y,z)]$ e la sua raffigurazione nella fotografia $[P'(x',y')]$. L'allineamento dei tre punti lungo una retta è descritto analiticamente con una funzione lineare, nota in fotogrammetria come *equazione di collinearità*. Tale equazione, scritta in funzione della distanza focale (f) della camera usata⁸¹ e di una matrice di rotazione tra il quadro e l'oggetto (r_{ij}), consente di risolvere analiticamente il problema fotogrammetrico [fig. 17]. Di seguito la formulazione canonica dell'equazione di collinearità

$$x = -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_0$$

$$y = -f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_0$$

in cui x_0 e y_0 sono le coordinate del punto principale P_0 (la proiezione di V sul quadro) e X_0 , Y_0 e Z_0 sono le coordinate tridimensionali del centro di proiezione dell'immagine (V).

Se tale procedura è applicata ad ogni significativo punto dell'immagine fotografica, , sarà generato un fascio di rette proiettanti, meglio noto come *bundle of rays*, convergenti verso il centro della camera. Tali fasci richiedono due orientamenti distinti: un orientamento interno, eseguito in funzione dei parametri di calibrazione del sensore e un orientamento assoluto, riferito alla scena tridimensionale.

I primi software di restituzione che integrano equazioni di collinearità risalgono agli anni Novanta; tali applicativi, pur rappresentando un primo passo in termini di rapidità e automazione, richiedono la conoscenza dei parametri di calibrazione della camera (orientamento interno) e il costante controllo delle procedure di restituzione attraverso l'individuazione manuale di punti omologhi tra fotogrammi corrispondenti.

Lo sviluppo di funzioni in grado di risalire automaticamente ai parametri di calibrazione della camera ha consentito di procedere all'auto-calibrazione dell'intero processo, aprendo all'uso di camere e ottiche non calibrate e lasciando al rilevatore il compito di individuare i punti omologhi e procedere alla restituzione digitale. Il passaggio che ha determinato la 'rinascita' dei metodi fotogrammetrici e la loro riaffermazione come valida alternativa ai metodi *range-based* va individuato nello sviluppo di algoritmi in grado di sostituire la componente umana anche nel processo di *matching*, ossia nell'individuazione simultanea di punti omologhi su immagini di una stessa scena, acquisite da diversi punti di vista⁸².

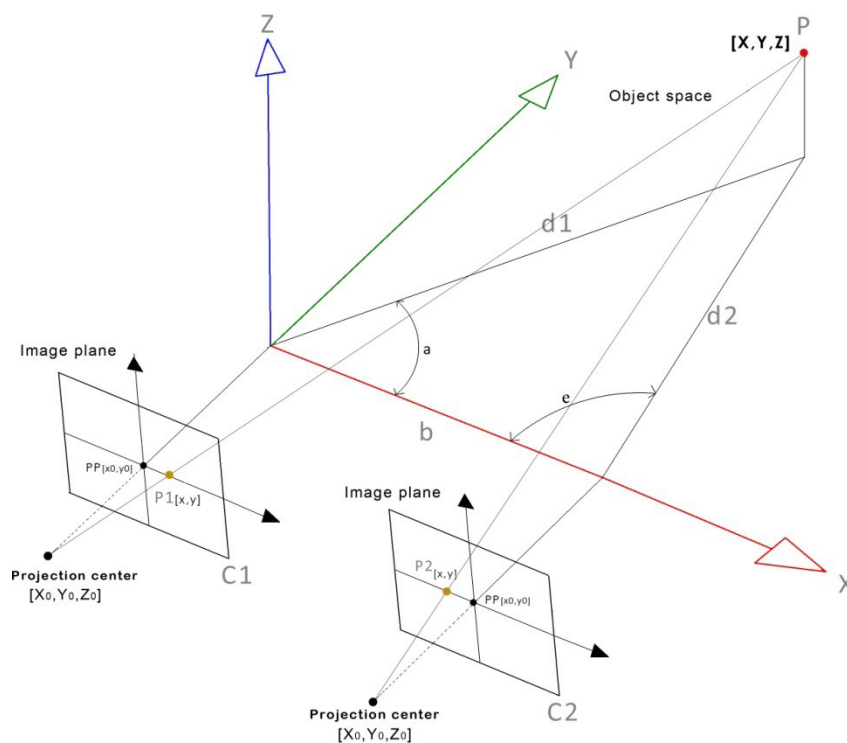


Figura 17; principio di collinearità (ALITANY 2013, p. 118).

Riguardo all'accuratezza di tali procedure, questione ampiamente valutata in letteratura⁸³, è possibile affermare che:

- cresce se le immagini convergono sull'oggetto scandito;
- cresce all'aumentare del numero di immagini in cui tale punto è visibile;

- cresce all'aumentare dei punti rintracciati in ogni singola immagine purché siano ben distribuiti all'interno del fotogramma;
- è influenzata dalla risoluzione delle immagini processate (numero di *pixel*).

In ultima analisi, la *pipeline* definita all'inizio di questo paragrafo ha subito, negli anni, un progressivo percorso di automazione, che mantiene elevati livelli di accuratezza metrica e geometrica e permette di abbattere significativamente i tempi di calcolo; la possibilità di demandare l'orientamento ai software introduce un ulteriore vantaggio:

Se il metodo analogico concepito da Johan Heinrich Lambert e sperimentato con la fotografia per la prima volta dall'architetto tedesco Maydenbauer nel 1858, ma anche il successivo sistema analitico che Carl Pulfrich mette a punto costruendo nel 1901, presso le officine Karl Zeiss di Jena, il primo stereocomparatore, restano sostanzialmente tecniche criptiche nelle mani di pochi esperti, il digitale per la prima volta consente di fruire di una tecnologia ormai in equilibrio maturo saturo per la tipologia di lavoro in oggetto, a un livello ormai definibile come semi-professionale o professionale e non più di laboratorio di ricerca, con conseguente semplificazione delle procedure e loro ripetizione⁸⁴.

Da poco più di un decennio sono state sviluppate procedure di automazione per l'intero processo restitutivo; i più recenti algoritmi consentono di automatizzare gran parte delle procedure di rilevamento e ridurre sensibilmente i tempi di calcolo.

Per effetto di tale automazione, si distinguono in letteratura tre possibili approcci procedurali⁸⁵: il primo, basato su tecniche semi-automatiche, consente la ricostruzione delle forme attraverso l'uso di immagini calibrate e orientate⁸⁶ e il riconoscimento di elementi significativi sulla scena; il secondo e il terzo, basati su procedure automatiche, consentono l'acquisizione di nuvole di punti e modelli di superficie da immagini calibrate e non. Afferiscono al primo approccio le procedure e i software di fotomodellazione; fanno parte del secondo approccio le esperienze maturate nell'ambito delle tecniche *Dense Stereo Matching* (DSM) e *Structure from Motion* (SfM).

2.4.3 La fotomodellazione

Alcune *software house* hanno sviluppato applicativi che integrano algoritmi di correlazione fotogrammetrica in ambienti di modellazione digitale; ciò permette di procedere al riconoscimento di elementi significativi sulle immagini fotografiche di una scena, come spigoli, vertici e superfici, che concorrono a definire un modello tridimensionale, composto da figure geometriche e solidi semplici, in ambiente virtuale che assume lo stesso orientamento delle fotografie. Tale metodo, sebbene sia fortemente incentrato su principi di fotogrammetria, prevede che contestualmente alla fase di acquisizione si avvii la produzione del modello digitale; a differenza delle altre tecniche di acquisizione, tale aspetto rende la fotomodellazione una procedura ibrida, capace di espletare l'intero iter di rilievo e rappresentazione.

Applicare la fotomodellazione alla ricostruzione 3D di edifici obbliga l'utilizzatore a uno sforzo di interpretazione che coincide necessariamente con la comprensione delle forme architettoniche che lo compongono. Questo corrisponde a una prassi in perfetta continuità logica con la storia della rappresentazione architettonica e che non limita il rilevamento architettonico al semplice controllo di macchine e procedimenti tecnici "per prendere punti"⁸⁷.

Il principio alla base della fotomodellazione è il medesimo impiegato per la fotogrammetria tradizionale e si basa sull'uso delle *rette epipolari*. Come detto, nella fotogrammetria stereoscopica la posizione di un punto

nello spazio può essere ricavata se tale punto è visibile in almeno due distinti fotogrammi e se sono noti i parametri di orientamento interno della fotocamera (distanza punto principale, dimensione fotogramma, parametri di distorsioni etc.) e quelli di orientamento esterno relativi e assoluti (posizione relativa dei fotogrammi, scalatura e orientamento assoluto del modello). In maniera analoga è possibile estrarre delle informazioni metriche da due o più panorami equirettangolari, in seguito a mirate operazioni di orientamento.

Una prima fase prevede l'acquisizione e l'importazione in un apposito software di un set di immagini, in cui l'oggetto è raffigurato in maniera sovrabbondante, o importando più immagini equirettangolari precedentemente assemblate attraverso noti processi di *photo stitching*. L'uso di panorami equirettangolari naturalmente offre il vantaggio di una gestione più agevole rispetto alle singole fotografie.

La seconda fase prevede che in ogni fotografia vengano contrassegnati, manualmente o automaticamente, una serie di punti omologhi significativi, con la possibilità di controllare ed affinare il processo per fasi successive; a tale scopo, alcuni studiosi provvedono a collocare preventivamente dei target sulla scena da rilevare, in modo che il processo di individuazione dei punti omologhi avvenga con maggiore accuratezza. Al fine di affinare l'orientamento delle fotografie, è possibile introdurre una serie di condizioni metriche e geometriche di riferimento come la distanza nota tra due punti o la condizione di verticalità di alcuni oggetti. Infine il software, attraverso algoritmi che applicano i noti principi di geometria proiettiva, consente di rintracciare l'orientamento reciproco delle fotografie e organizzarle in una scena virtuale coerente con la scena tridimensionale acquisita. Le foto vengono pertanto fuse insieme attraverso procedure automatiche di *blending*, che permettono di ottenere una singola immagine, nella quale le aree di sovrapposizione vengono dissimulate. Avendo orientato le immagini, è possibile misurare angoli e distanze direttamente sulle fotografie, riconoscendo spigoli, vertici ed elementi significativi; queste fasi completano la parte relativa all'acquisizione.

Sulla scena tridimensionale appena creata, l'operatore costruisce un modello 3D attraverso l'uso di solidi semplici che descrivano accuratamente la morfologia degli oggetti rilevati. È evidente che tale operazione costituisce già la prima fase di un nuovo processo, basato sull'interpretazione semantica dell'opera, poiché obbliga a operare una sintesi dei dati acquisiti. Questa procedura consente di ricostruire la geometria di una scena tridimensionale non soltanto indicando le dimensioni, la posizione e l'orientamento di primitive, bensì deducendo direttamente tali parametri attraverso la sovrapposizione di facce, spigoli e vertici sulla scena virtuale, basandosi sull'osservazione diretta delle immagini acquisite. Ultima fase di tale processo è la texturizzazione dei modelli, attraverso la proiezione delle immagini sulle primitive geometriche costruite. Dal modello texturizzato vengono infine estratte le ortofoto degli ambienti rilevati semplicemente individuando il piano di proiezione.

Le procedure di fotomodellazione, nella loro formulazione attuale, sono frutto di una sintesi dei principali studi condotti negli ultimi venti anni. Uno tra i primi sistemi di fotomodellazione, sviluppato nel 1996 e noto come *programma Façade*⁸⁸, consentiva di individuare la geometria semplice di un oggetto attraverso l'uso di primitive, assumendo inizialmente come valori "noti" la dimensione dell'oggetto e l'orientamento interno della camera. Il secondo passaggio consentiva di affinare la forma dell'oggetto per successive approssimazioni, attraverso procedure automatiche di *matching*, basate sui parametri delle primitive definite in precedenza. In tal modo l'attendibilità dell'intero processo dipendeva dalla stima delle primitive definite dall'operatore.

Successive esperienze hanno permesso di affinare il processo di ricostruzione della scena tridimensionale attraverso l'impiego di condizioni geometriche note (parallelismo, ortogonalità), principi matematici e prospettici e infine procedure di *bundle adjustment*⁸⁹.

Sebbene la fotomodellazione consenta l'unione della fase di acquisizione e modellazione, appaiono tuttora irrisolti alcuni nodi problematici. In primo luogo la limitata flessibilità nel disegno di forme complesse si rivela particolarmente condizionante specie in un ambito come quello dell'architettura storica, nel quale le forme dei manufatti possono essere difficilmente assimilabili alle primitive geometriche disponibili; l'assenza di adeguati strumenti di modellazione costringe quindi gli addetti ai lavori a utilizzare la

fotomodellazione solo nella fase iniziale del processo di modellazione, che viene completato con l'ausilio di altri applicativi CAD; il modello generato viene quindi ritrasferito nell'applicativo di fotomodellazione per procedere al texturing.

In secondo luogo, altre difficoltà sono rilevabili nel caso in cui sia necessario produrre un modello che tenga conto delle deformazioni del manufatto, non facilmente rappresentabili da primitive geometriche. Anche in questo caso è necessario il ricorso a software più complessi o a tecniche di modellazione differenti.

La necessità di un'interpretazione semantica dell'opera rilevata è uno tra i più rilevanti vantaggi che questa tecnica offre.

2.4.4 Dense Stereo Matching (DSM) e Structure from Motion (SfM)

Gli approcci che si avvalgono di procedure automatiche per acquisizioni fotogrammetriche si basano sull'uso di fotografie acquisite con ottiche calibrate e non; tali procedure sfruttano le proprietà dei punti individuabili sulle aree di sovrapposizione tra due o più fotografie convergenti sullo stesso oggetto; gli output di entrambe le procedure sono nuvole di punti colorate che riproducono con effetti realistici la scena tridimensionale acquisita.

Le procedure che richiedono l'uso di camere calibrate, note come procedure di *Dense Stereo Matching*, uniscono all'accuratezza delle tradizionali procedure di misurazione fotogrammetrica (camere calibrate) i vantaggi in termini di rapidità offerti dai più recenti algoritmi per il *matching* di punti omologhi. Tali tecniche, giunte ad una formulazione pressoché compiuta nel 1995⁹⁰ e più volte testate negli ultimi venti anni⁹¹, permettono, previa l'identificazione di punti omologhi nella zona di sovrapposizione di due fotogrammi, di costruire un sistema di orientamento della scena tridimensionale; algoritmi di *dense matching* provvedono quindi ad estrarre i punti omologhi attraverso un processo di correlazione. Infine, assegnando ai punti di riferimento coordinate riferite al sistema di orientamento utilizzato per la misura (ad esempio rilievo topografico), il modello fotogrammetrico viene scalato e orientato nello spazio. Un buon esito del processo di *matching*, che è legato prevalentemente al tipo di superficie rilevata, si ha nel caso di superfici variamente colorate o sulle quali sono visibili pattern materici distinti; viceversa, il processo di correlazione può essere affetto da margini di errore rilevanti. Per tale motivo questa tecnica si addice particolarmente al rilievo di oggetti dalla forma complessa, o, a tutt'altra scala, di aree archeologiche, per le quali è spesso necessario l'uso di ottiche calibrate.

Le tecniche SfM, applicate in modo sempre più diffuso alla documentazione dei beni culturali nel recente passato, giungono all'acquisizione di nuvole dense applicando il *matching* a set di fotografie acquisite anche con ottiche non calibrate. Le tecniche SfM, la cui storia è legata ai progressi scientifici che negli ultimi trent'anni hanno caratterizzato il settore della *computer vision*, sono sostanzialmente articolate in due fasi, che riguardano due distinti ambiti di ricerca: il primo riguarda i processi di correlazione (*feature correspondence*); il secondo riguarda l'autocalibrazione delle immagini (*self-calibrating*) e la costruzione di nuvole di punti. La procedura di *feature correspondence* consente di individuare in modo automatico su fotografie distinte, i punti accomunati da medesime caratteristiche (*keypoints*), che concorrono a formare una nuvola rada. Tali *keypoints* sono fondamentali per la successiva fase di costruzione della nuvola densa, poiché sulle dette corrispondenze si basa l'estrazione delle coordinate tridimensionali della nuvola. Le prime esperienze nell'ambito della *feature correspondence* consentivano il matching dei punti confrontando i pixel delle immagini in un intorno abbastanza ristretto (*patch*); in tal modo, l'individuazione del punto corrispondente avveniva solo se le due fotografie erano acquisite da punti contigui e se le due patch avevano gradazioni cromatiche simili⁹². Per tale ragione, i primi tentativi di acquisizione tramite procedure SfM prevedevano l'uso di sequenze video per l'estrazione di dati tridimensionali. Questa tecnica è stata poi applicata utilizzando immagini statiche di un oggetto, organizzate in una sequenza preventivamente definita (come i fotogrammi di un video). Solo in seguito, grazie allo sviluppo di un algoritmo che elimina i problemi legati alla scala di raffigurazione, è stato possibile impiegare fotografie secondo un ordine del tutto casuale. L'algoritmo, noto come *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT)⁹³, permette di individuare i *keypoints*

prescindendo dalle variazioni di distanza tra oggetto e camera, di orientamento interno e, seppur parzialmente, di luminosità dell'ambiente. I *keypoints* individuabili in una prima fotografia vengono registrati in un database e confrontati con quelli individuabili nella successiva immagine; dall'insieme completo di corrispondenze vengono identificati sottoinsiemi di *keypoints*, raggruppati per caratteristiche simili, che manifestano una maggiore corrispondenza in termini di dimensione e scala, mentre vengono scartati i punti rimanenti. Infine, un'ulteriore selezione si basa sul calcolo delle probabilità che ad ogni particolare insieme di *keypoint* corrisponda un oggetto reale. I *keypoints* che superano tali verifiche vengono utilizzati per costituire la nuvola rada [fig. 18]; a tali punti sono associate coordinate spaziali e una terna di valori RGB.

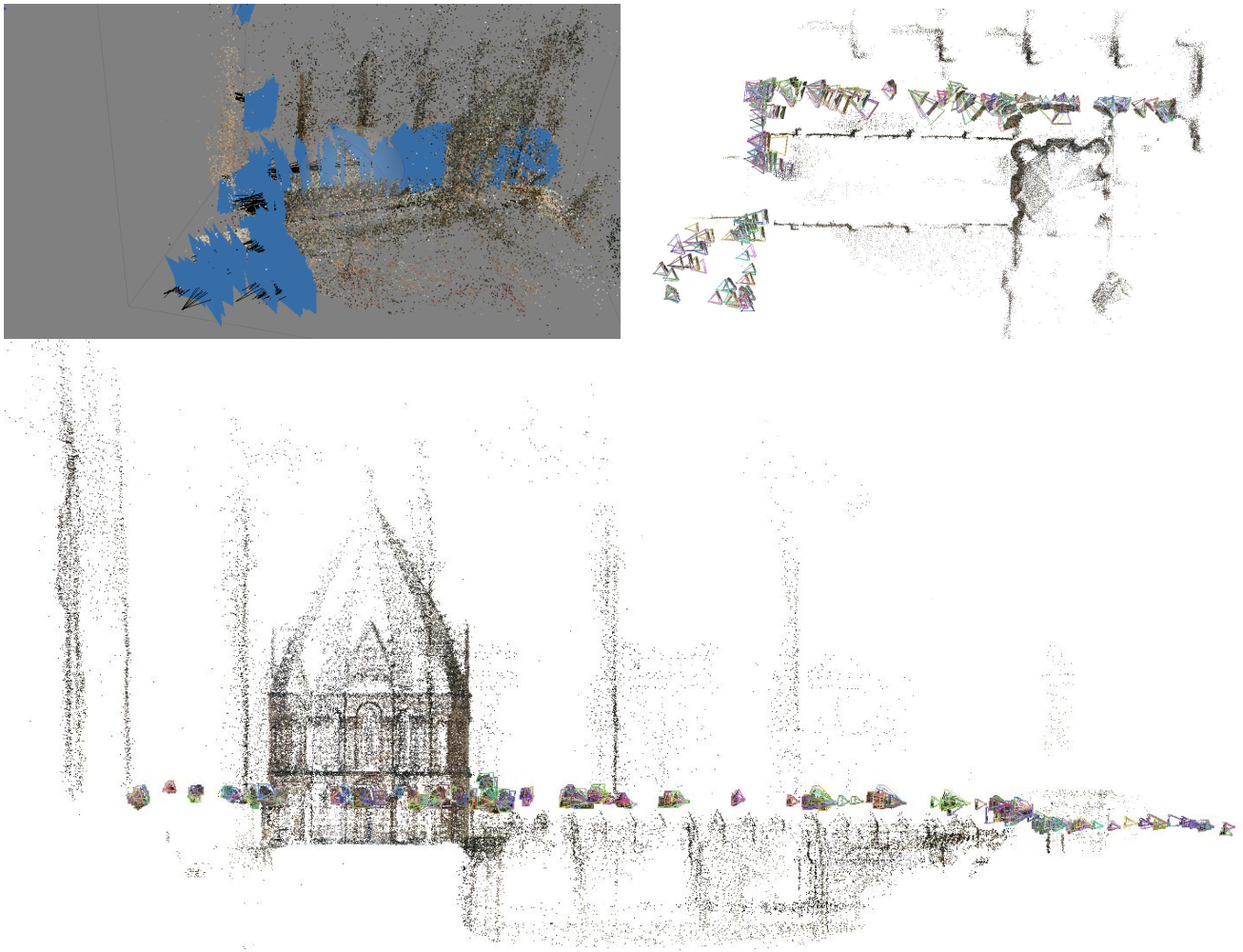


Figura 18; sequenza fotografica e nuvola di punti rada della cupola di Salamanca; (a) esiti del processo di correlazione automatica con il software Agisoft Photoscan; (b) (c) esiti della correlazione con VisualSfM.

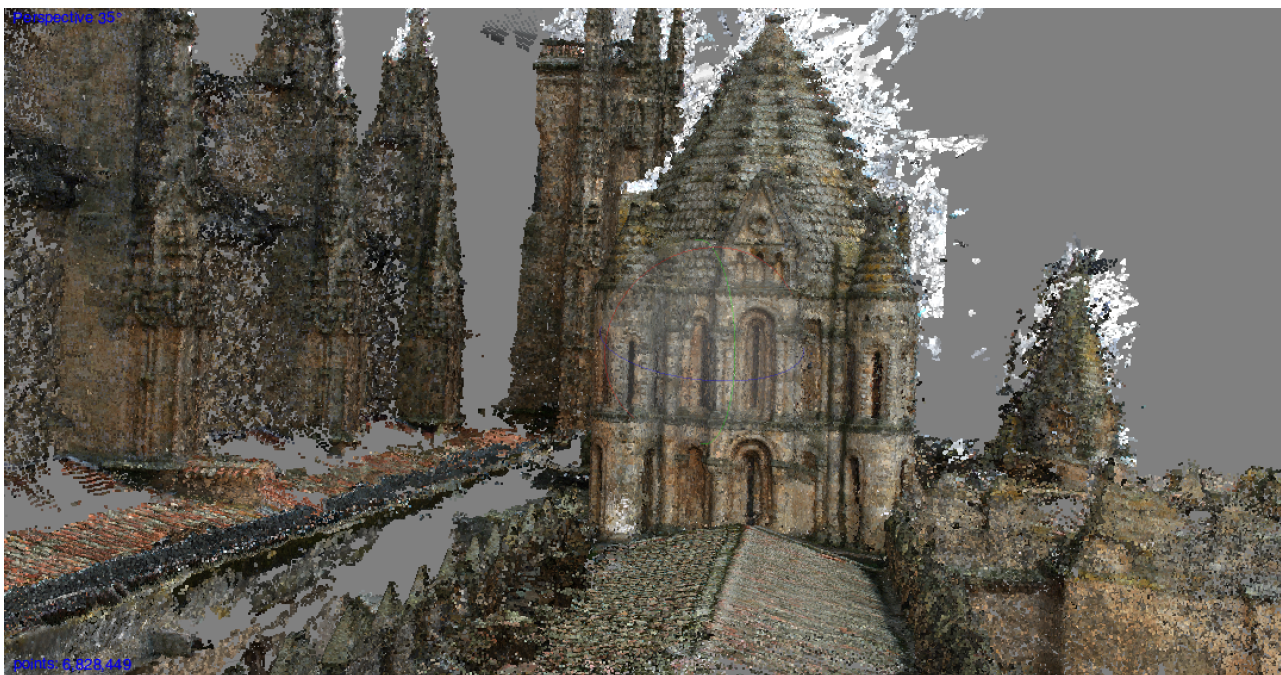


Figura 19; esiti del dense matching per la nuvola di punti della cupola di Salamanca.

La seconda fase, nota come *dense matching*, prevede l'individuazione dei punti omologhi e la costruzione della nuvola [fig. 19]. Presupposto fondamentale per questa procedura è la stima dei punti di presa delle immagini fotografiche; agli anni Ottanta è possibile far ricondurre lo sviluppo di tecniche in grado di ricostruire la scena tridimensionale raffigurata in un insieme di fotografie e risalire simultaneamente a posizioni ed orientamenti interni. Già nel 1981 tale processo era applicato con successo ad un sistema basato su due fotografie⁹⁴, mentre negli anni Novanta l'introduzione di processi *multi-frame*⁹⁵ estendeva il campo di applicazione di tale tecnica. Più recentemente, per affinare il processo di auto-calibrazione, tale settore si è avvalso di procedure già in uso nel campo della fotogrammetria stereoscopica come il *bundle adjustment*. Tale metodo, noto anche come *compensazione a stelle proiettive*, sfrutta le proprietà geometriche delle rette proiettanti in prospettiva⁹⁶ per operare un "aggiustamento" progressivo dei raggi che dai punti selezionati nella scena reale convergono verso il centro ottico della camera. L'algoritmo che determina la corretta posizione dei raggi agisce stimando contemporaneamente e in tempo reale sia la posizione dei punti omologhi nella scena tridimensionale, sia la posizione dei punti di presa. Tale processo conduce alla produzione di una nuvola di punti densa, anche in assenza dei parametri di calibrazione della camera, che sono così dedotti automaticamente (*self-calibrating bundle adjustment*). In alcuni casi la stima dei parametri di calibrazione, spesso limitati ai soli valori di distanza focale, avviene a-posteriori, determinando un ulteriore passaggio nel quale la nuvola subisce un *upgrade* metrico; recenti esperienze⁹⁷ hanno dimostrato di poter giungere a medesimi risultati eseguendo una stima di tali parametri per ogni singola immagine, evitando il passaggio di verifica finale.

Le procedure SfM, che trovano già largo impiego nel settore dei beni culturali, possiedono tuttora discreti margini di miglioramento; rispetto alle prime esperienze, condotte con hardware dalle elevate capacità computazionali, oggi tali procedure consentono di organizzare elevate quantità di immagini in una matrice e processarle simultaneamente con hardware comunemente in commercio e in tempi relativamente ridotti.

Le procedure DSM e SfM conducono alla generazione di nuvole di punti del tutto paragonabili a quelle acquisite con metodi *range-based*. I punti di forza di tali tecniche risiedono nel basso costo dei dispositivi per l'acquisizione (camere digitali) e nella loro trasportabilità. Il maggiore punto di debolezza risiede nell'elevato numero di elementi che possono condizionare l'accuratezza del processo di restituzione: condizioni di luce disomogenea su foto che ritraggono lo stesso oggetto da diverse angolazioni; presenza di superfici riflettenti; bassa qualità delle immagini.

Le tecniche DSM e SfM richiedono accorgimenti e professionalità superiori a quelle necessarie per il buon esito di un rilievo *range-based*; tuttavia il processo di automazione nell'orientamento e nella correlazione ha determinato una progressiva apertura anche ai non addetti ai lavori.

Va infine ricordato che il processo di restituzione fotogrammetrica conduce alla generazione di modelli corretti sotto il profilo proporzionale ma privi di definizione dimensionale e orientamento assoluto: la caratterizzazione dimensionale viene attribuita a-posteriori, misurando le coordinate di alcuni punti ben visibili nelle immagini (o di target disposti all'interno della scena) o la distanza tra due punti; l'orientamento viene determinato imponendo ai punti visibili sulla nuvola le coordinate note. Anche questi processi possono condizionare sensibilmente l'accuratezza della nuvola di punti.

Al termine delle procedure di acquisizione, le nuvole possono presentare lacune prevalentemente dovute a condizioni di illuminazione sfavorevoli o alla mancanza di sufficienti sovrapposizioni tra le fotografie; in tal caso, per la corretta generazione di un modello mesh è necessaria l'integrazione con dati acquisiti attraverso altre tecniche.

Nel corso degli anni, l'ampio uso di algoritmi *open source* ha permesso lo sviluppo di tools efficienti e rapidi per la ricostruzione fotogrammetrica, tra i quali si segnalano MicMac, PMVS, Apero e Bundler, oltre ai più noti software commerciali e *open source* come Microsoft Photosynth®, Insight3d, Hypr3D®, VisualSfM, ARC 3D, SFMToolkit, Agisoft PhotoScan e Autodesk 123D Catch®. A tal proposito è utile precisare che lo sviluppo tecnologico che ha contraddistinto il settore della fotogrammetria stereoscopica durante l'ultimo decennio ha permesso l'integrazione di entrambe le tecniche nei principali software commerciali; pertanto la distanza tra le procedure afferenti alle due metodologie si è sensibilmente assottigliata e in alcuni casi è persino scomparsa.

2.5 Verso una *point cloud library* globale dei beni culturali

L'automazione delle procedure fotogrammetriche ha recentemente raggiunto livelli soddisfacenti, sia nella fase di orientamento⁹⁸, sia nella fase di correlazione automatica⁹⁹. L'evoluzione degli apparati strumentali e delle procedure per l'acquisizione dei dati metrici ha condotto alla definizione di metodologie integrate, in grado di generare nuvole di punti in maniera automatica e semiautomatica. La fase successiva all'acquisizione è quindi l'ottimizzazione dei dati e la definizione di un modello digitale. Prima di affrontare la trattazione di un argomento così vasto, è utile soffermarsi sulle opportunità che tali insiemi di dati offrono per la documentazione dei beni culturali.

È opportuno ricordare che, nel caso del patrimonio culturale, i dati 3D costituiscono una componente rilevante nel processo di documentazione e conservazione, per almeno tre ragioni: a) per la capacità di registrare l'esistente nella configurazione assunta in un determinato istante di tempo; b) per il contributo alle attività di monitoraggio di degradi strutturali e di danni prodotti da eventi sismici, grazie alla possibilità di confrontare registrazioni acquisite in momenti distinti; c) per la possibilità di tramandare informazioni dettagliate sul manufatto alle generazioni future.

Attualmente la produzione dei modelli digitali *reality-based* avviene secondo tecniche non codificate, complice la rapidità con cui tale settore si è sviluppato; pertanto i modelli virtuali, concepiti per determinati scopi, poco si prestano a impieghi multidisciplinari. Questa difficoltà è amplificata dal costante ricorso a *team* di ricerca eterogenei (esperti in rilievo e rappresentazione, storici dell'architettura, archeologi, strutturisti, ecc.) che conducono sul medesimo manufatto indagini complementari ma non sempre adeguatamente coordinate; i limiti dovuti all'assenza di procedure di modellazione univoche rendono talvolta inutilizzabili gli output scientifici anche tra i componenti dello stesso gruppo di ricerca¹⁰⁰; spesso avviene quindi che il modello generato dal rilievo non sia utilizzabile per altri scopi e che alcuni degli specialisti ricorrano alla costruzione di nuovi modelli. Le strategie finora adottate per superare tali limiti sono sostanzialmente due:

- La creazione di una banca dati di nuvole di punti e modelli digitali¹⁰¹, fruibile via web;
- La definizione di procedure univoche di modellazione che conducano alla produzione di modelli *interoperabili*, ossia utilizzabili per diversi scopi, senza ridurne la complessità geometrica¹⁰².

Fra le banche dati in fase di costruzione si segnala, per dimensione e rilevanza, il *CyArk digital archive*¹⁰³; si tratta di un database che raccoglie contenuti digitali di vario genere (nuvole di punti, modelli *mesh*, elaborati grafici tradizionali) su una piattaforma online che ne consente la consultazione e la visualizzazione interattiva. Le singole piattaforme possono integrare vari comandi di gestione dei dati come la generazione di sezioni della nuvola di punti o l'estrazione di viste ortografiche [fig. 20].

Tra le altre principali banche dati è utile ricordare i progetti *Potree* e *3DHOP*: *Potree*¹⁰⁴ è un visualizzatore di nuvole di punti WebGL¹⁰⁵ capace di gestire grandi quantità di dati 3D grazie all'impiego di algoritmi sviluppati per migliorare la qualità dei dati acquisiti¹⁰⁶ e la loro visualizzazione; *3DHOP*¹⁰⁷ (3D Heritage Online Presenter) sviluppato dal Visual Computing Lab, ISTI-CNR, è prevalentemente impiegato in ambito museale per la relativa semplicità con la quale è possibile integrare i modelli tridimensionali su comuni *web-browser*¹⁰⁸.

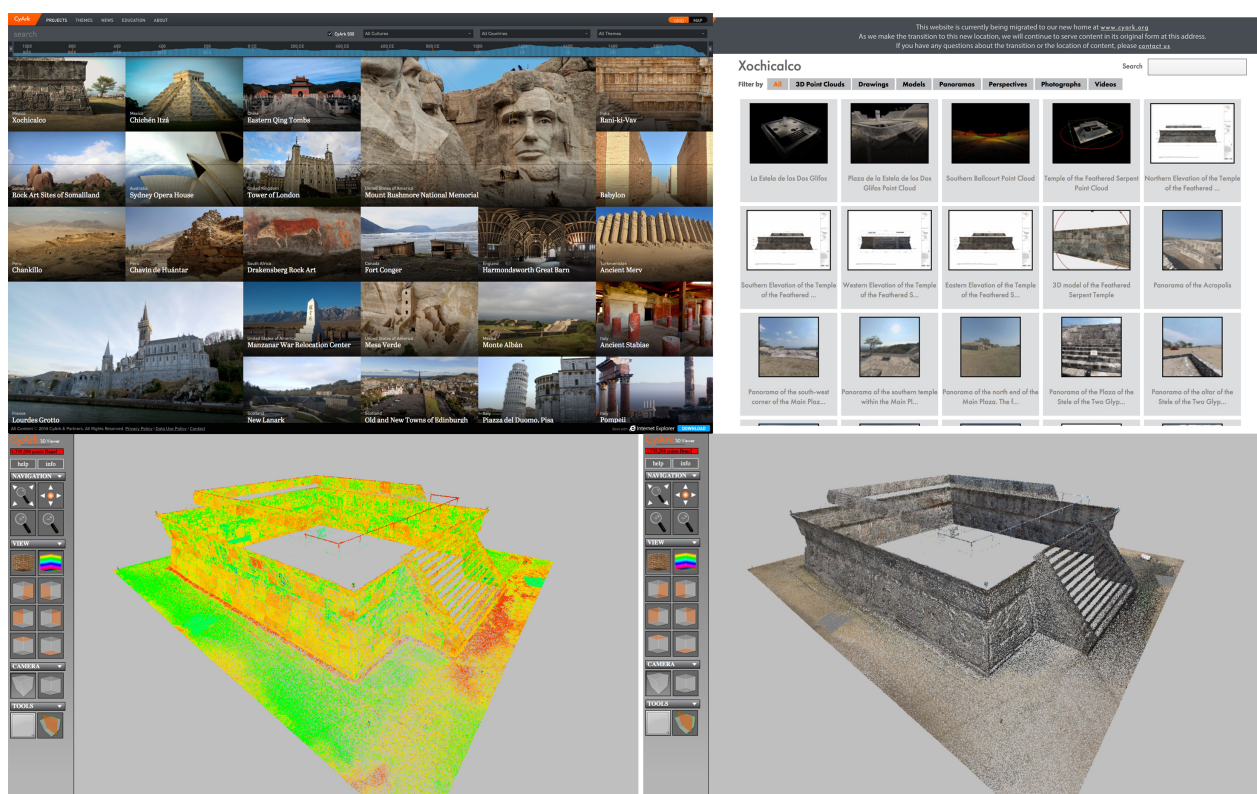


Figura 20; database e nuvole di punti disponibili su cyark.org. Attraverso un pannello di controllo dalla grafica intuitiva l'utente può interrogare le nuvole di punti e i modelli mesh disponibili online.

Le esperienze condotte in tale settore offrono l'indiscusso vantaggio di concentrare in un unico portale le numerose acquisizioni dei beni culturali eseguite da centri di ricerca di tutto il mondo e di renderle simultaneamente utilizzabili per scopi scientifici; non meno rilevanti sono le possibilità offerte da tali strumenti nel processo di conservazione programmata e la possibilità di rendere tali dati disponibili anche ai non addetti ai lavori, grazie allo sviluppo di comandi ed interfacce *user-friendly*. L'estrema eterogeneità delle procedure di acquisizione e degli *output* prodotti, dovuta all'assenza di una codifica metodologica, ne costituisce tutt'oggi il principale limite.

2.6 La ricostruzione di edifici diruti da fotografie d'epoca: tecniche di restituzione prospettica

Nel caso di edifici diruti o profondamente alterati nel tempo, un approccio integrato e una forte componente interpretativa costituiscono fattori essenziali per la formulazione di ipotesi ricostruttive sulla sua congetturale veste perduta. In molti casi lo stato di conservazione di un manufatto non è sufficiente a documentarne la configurazione originaria; ad aggravarne le condizioni contribuiscono secoli di modifiche, incurie, devastazioni ed erosioni dovute a intemperie e attività umane. Nei casi in cui la sola osservazione del manufatto non sia sufficiente, è utile ricorrere a strumenti d'indagine alternativi, come fonti documentarie, iconografiche e, quando disponibili, fotografie d'epoca.

Per edifici diruti o irrimediabilmente alterati, la fase di acquisizione è limitata generalmente alla registrazione di quanto rimane del manufatto; i dati acquisiti sono impiegati per dotare le ipotesi ricostruttive del giusto grado di correlazione con l'esistente o come strumenti di validazione. Una cospicua parte delle indagini su tali manufatti si basa sull'esame delle fotografie d'epoca, un patrimonio predeterminato, generalmente frammentario e soggetto anch'esso a usura. Sebbene in alcuni rari casi sia possibile usufruire di quantità di immagini e documenti sufficienti alla ricostruzione, spesso accade che la natura frammentaria delle fonti impedisca l'applicazione di procedure di fotogrammetria stereoscopica. I limiti che caratterizzano tale approccio ricostruttivo sono di due tipi: il primo è legato al patrimonio documentario e alla sua consistenza; il secondo è di matrice procedurale. Uno tra i principali limiti legati alla consistenza del patrimonio documentario è dovuto alla difficoltà nel riconoscere fotografie appartenenti a un manufatto non più esistente e nel trovarne la giusta collocazione all'interno del sito; tale compito è reso ancor più arduo se le fotografie appartengono ad epoche distinte e documentano diverse configurazioni assunte dal manufatto.

I limiti procedurali il più delle volte derivano dalle tecniche che si intendono impiegare per la ricostruzione: si è detto che presupposto per un buon esito delle tecniche *image based* è la corretta stima del punto di presa, ossia della posizione in cui l'operatore ha posto la camera per lo scatto; i moderni algoritmi consentono tale stima solo se il manufatto è riprodotto in maniera sovrabbondante e con sufficienti aree di sovrapposizione nelle immagini, condizioni che si verificano solo in rari casi. In secondo luogo è utile ricordare che tali fonti sono spesso soggette a riproduzioni, adattamenti, riduzioni e riacquisizioni che possono usurare i supporti, alterare le dimensioni e le proporzioni del fotogramma iniziale, o ancora produrre deformazioni locali.

Tali considerazioni suggeriscono l'uso di un approccio basato su tecniche di restituzione prospettica; il contributo interpretativo necessario per la restituzione consente di superare i limiti di un approccio automatico. I fondamenti teorici della restituzione prospettica sono i medesimi visti per le tecniche fotogrammetriche, mentre i due metodi differiscono nelle procedure.

È utile sintetizzare i presupposti metodologici e la linea procedurale di riferimento per la restituzione prospettica. Dopo la selezione delle fotografie da sottoporre a restituzione, si procede rintracciando l'orientamento interno di ogni fotografia, ossia l'insieme degli elementi necessari a definire univocamente la proiezione prospettica: il punto principale, ossia il ribaltamento sul quadro del centro di proiezione, la linea d'orizzonte, ossia la retta che contiene i punti di fuga, e la linea di terra. Fissato l'orientamento interno si procede manualmente alla restituzione degli elementi raffigurati nella fotografia individuando i punti di fuga degli spigoli delle superfici e le relative giaciture.

A differenza della maggior parte delle altre tecniche fotogrammetriche, la caratterizzazione dimensionale è attribuita durante il processo di restituzione attraverso procedure grafiche e viene verificata per successive fasi, garantendo pertanto la validazione dell'intero processo.

La restituzione prospettica è particolarmente adatta alle applicazioni sul patrimonio culturale poiché, sebbene richieda tempi più lunghi e una buona dose di conoscenze, consente accurate ipotesi ricostruttive sulle originarie configurazioni dei manufatti e un controllo costante sul processo di restituzione grazie al contributo interpretativo dell'operatore, che determina, volta per volta, gli elementi da restituire, il grado di dettaglio da perseguire e la strategia per la restituzione. L'avvento dei sistemi CAD ha consentito negli anni di affinare il processo di restituzione, riducendo sensibilmente gli errori di graficismo che potevano essere

commessi in passato con l'uso di squadre e compasso; una vera e propria automazione, tuttavia, non ha ancora preso campo, complice le difficoltà appena enunciate. Negli anni sono stati sviluppati software in grado di assistere l'operatore nella restituzione, senza però sostituirsi ad esso; tra i software di restituzione prospettica si ricordano a mero titolo esemplificativo *Euclid*, sviluppato da Camillo Trevisan, e *Brunelleschi*, sviluppato da Francesco Vinci.

2.7 Conclusioni

Negli anni, le tecniche impiegate per la registrazione del patrimonio culturale si sono evolute per rispondere alle esigenze poste dal processo di documentazione e conservazione dei beni architettonici, archeologici e artistici. Complice di tale evoluzione è il progresso tecnologico e informatico che ha permesso una consistente semplificazione e automazione dei processi. Fino a un decennio fa la rapidità e l'accuratezza nella registrazione del dato tridimensionale conferiva alle tecniche *laser scanning* un indiscusso vantaggio; l'impossibilità di ottenere simili risultati con tecniche fotogrammetriche rendeva il rilievo con sensori attivi più efficace del rilievo con tecniche *image-based*; il costo elevato degli scanner veniva infatti compensato da rapidità e accuratezza di gran lunga superiori a quelle raggiungibili con le tecniche fotogrammetriche.

Negli ultimi tempi l'evoluzione dei sensori *range-based* ha rallentato il passo e sta attraversando una fase di progressivo assestamento a causa del raggiungimento dei limiti fisici di portata e rapidità degli strumenti; nello stesso periodo si è avuta un'improvvisa e sorprendente evoluzione dei metodi fotogrammetrici, che oggi sono in grado di proporsi come valide alternative ai metodi *range-based*.

Altre considerazioni riguardano le tecniche di restituzione prospettica; sebbene si tratti di procedure *image-based*, il grado di automazione raggiungibile è vincolato ai limiti oggettivi posti da fonti frammentarie e diversificate; l'impossibilità di condurre nuovi rilievi ad integrazione dei dati già disponibili e l'impossibilità di riconoscere automaticamente forme mutate nel tempo impediscono che la componente umana venga sostituita da un processo di discretizzazione automatica. Nonostante tali difficoltà, le tecniche di restituzione prospettica rimangono tuttora tra le più efficaci tecniche per la ricostruzione di edifici perduti.

I metodi *laser scanning* e fotogrammetrici, pur differendo nelle procedure e negli apparati strumentali, hanno una caratteristica comune: generano elaborati tridimensionali (nuvole di punti) sui quali vengono eseguite quelle operazioni di misura, lettura ed interpretazione dell'opera un tempo eseguite sul manufatto con il rilievo diretto. La rapidità e l'accuratezza degli attuali metodi hanno fortemente alterato la sequenza temporale delle fasi del rilevamento architettonico; nella prima fase, si è indotti a orientare l'acquisizione verso la corretta applicazione delle procedure e l'ottimizzazione dei tempi, riducendo al minimo l'osservazione diretta del manufatto; nella seconda fase si procede, sullo schermo di un computer, alla sua misurazione e nei migliori casi anche alla sua lettura ed interpretazione. Spesso accade che gli operatori sul campo siano diversi da quelli che poi procederanno alla restituzione; questi ultimi osserveranno soltanto il simulacro digitale dell'opera. Del tutto assente in queste procedure la redazione di eidotipi, ossia di quei disegni sui quali venivano annotate le misure, vere e proprie prefigurazioni dei disegni di restituzione e momento cruciale del processo di discretizzazione.

L'evoluzione tecnologica di strumenti per la misura e la rappresentazione che ha caratterizzato l'ultimo ventennio ha contribuito alla definizione di figure di 'specialisti della misura', alla quale solitamente si contrappongono gli studiosi delle fonti letterarie e documentarie, che affrontano lo studio dell'architettura sotto il profilo storico ed interpretativo. La collaborazione tra *anciens* e *modernes* non è sempre facile e ciò non giova agli studi di architettura, o almeno a quella parte degli studi di architettura che utilizza il rilievo non solo per la documentazione ma anche per la conoscenza dei manufatti.

L'evoluzione tecnologica non solleva gli operatori del rilievo dalle seguenti responsabilità: a) conoscere e scegliere i metodi e gli strumenti che meglio si adattano alle caratteristiche dimensionali e morfologiche del manufatto; b) integrare tra loro le misure eseguite con diversi metodi; c) avanzare ipotesi di lettura

dell'opera; d) verificarne la validità; e) documentare le procedure seguite ed offrire alla comunità scientifica la possibilità di confrontare nuove misurazioni con quelle eseguite.

Le principali differenze fra i metodi *no-contact* e il rilievo diretto sono sintetizzate nella tabella 2.

tabella 2; confronto tra procedure di rilievo e restituzione.

	RILIEVO INDIRETTO	RILIEVO DIRETTO	RESTITUZIONE PROSPETTICA
RAPIDITÀ	Maggiore rapidità dovuta all'automazione delle procedure.	Procedure <i>time-consuming</i> , nessuna automazione.	Procedure <i>image-based</i> dotate di un basso livello di automazione.
ACCURATEZZA	Elevata, determinata dai limiti degli apparati strumentali.	Elevata, richiede maggiori capacità nell'operatore.	Variabile, determinata dalle fonti.
OUTPUT	Simulacri tridimensionali del manufatto rilevato.	Eidotipi	Disegni in scala di quanto raffigurato dalle fotografie esaminate e dati metrici.
CONTRIBUTO ALLA CONOSCENZA DEL MANUFATTO	Nessuno, il processo interpretativo è avviato in seguito.	Presente già in fase di acquisizione della misura; il rilevatore conduce una discretizzazione <i>in situ</i> .	Presente già all'avvio delle procedure e in costante crescita durante la restituzione.
PRINCIPALI VANTAGGI	Consente l'esame del manufatto in qualsiasi istante dal laboratorio, permette di misurare gli scarti tra configurazione ideale e manufatto.	Costringe l'operatore all'interpretazione semantica del manufatto; il rilevatore 'sceglie' le misurazioni da eseguire e il grado di semplificazione da operare.	Unico metodo che consente la formulazione di ipotesi ricostruttive coerenti su manufatti diruti e perduti. Il contributo alla conoscenza del manufatto dipende dalla sensibilità dell'operatore
PRINCIPALI SVANTAGGI	Nessuna osservazione del manufatto durante l'acquisizione; non sempre a tale processo segue l'interpretazione dei dati acquisiti.	Una lettura errata del manufatto obbliga a riacquisire la misura <i>in-situ</i> ; distinte finalità d'indagine impongono nuove acquisizioni.	La natura delle fonti può impedire la restituzione; procedure <i>time-consuming</i> ; aleatorietà dei dati in assenza di ulteriori strumenti di validazione.

capitolo 3 _ Rilievo e modelli digitali per il *Cultural Heritage*

«Los ordenadores son inútiles. Solo pueden darnos respuestas».

(PABLO PICASSO)

3.1 Interpretazione e segmentazione dei dati: metodi, procedure, esperienze¹⁰⁹

3.1.1 Metodi

Negli ultimi anni, il dibattito sull'interpretazione dei dati di un rilievo ha diviso gli studiosi in due gruppi, che per semplicità si potrebbero definire *umanisti* e *tecnologi*. Per gli *umanisti* il processo di modellazione costituisce il momento interpretativo, nel quale convergono le analisi e le ipotesi sviluppate e verificate sul dato "oggettivo" costituito dal simulacro tridimensionale. Per i *tecnologi* l'esigenza primaria rimane l'automatizzazione dei processi; per questi ultimi la mesh è già un modello e la discretizzazione può essere guidata da banche dati e da processi di riconoscimento automatico di forme, come se l'architettura fosse un semplice assemblaggio di elementi precostituiti.

In an architectural building project two essential points of views can be characterized. The first one is related to the architect who has an ideal and perfect design reference and the second one relates the concrete and imperfect real realization. In the same manner, the architectural surveying can be articulated around two points of views. The first one is related to the crude processing of the 3D data sets which produce an imperfect digital model and the second one is related to the exploitation of semantic information producing an enhanced design model of the real building.

In this way, the extraction of relevant information from the 3D digitized data [...] forms an important problem which must be addressed. To this end, semantic-based representations of patrimony buildings can thereby play an important role for the development of information systems in the architecture field.¹¹⁰

I tecnologi ritengono conclusa la procedura di rilievo con l'acquisizione della nuvola, che viene generalmente convertita in una mesh a maglia triangolare o quadrangolare. Va riconosciuto che, in base al livello di dettaglio conseguito, i modelli mesh sono particolarmente efficaci per la modellazione di quei

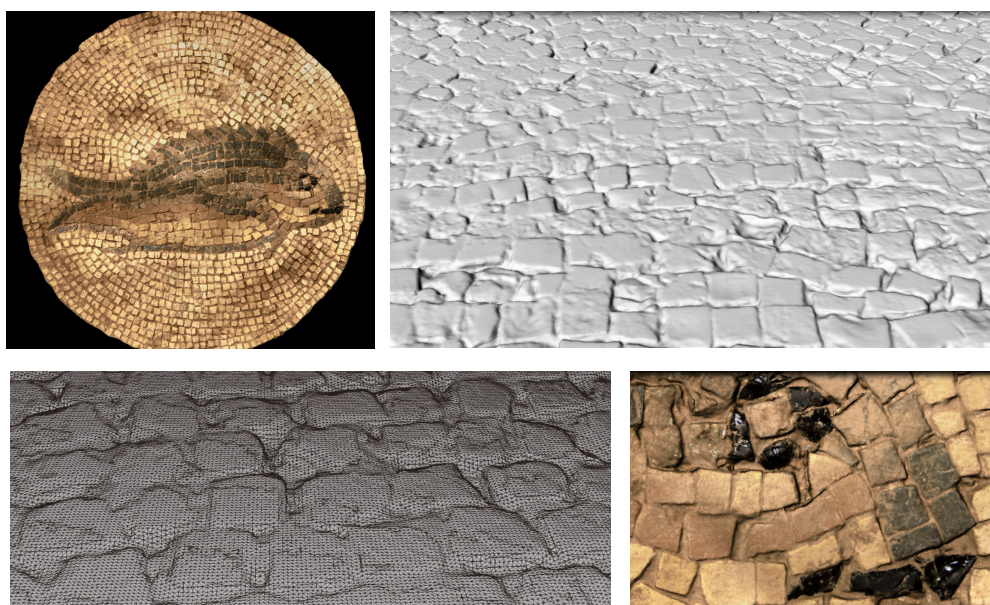


Figura 21; mesh di un rivestimento musivo; (a) modello mesh texturizzato; (b) vista prospettica della mesh; (c) struttura wireframe della mesh; (d) processo di mapping.

manufatti nei quali è assente o poco rilevante la caratterizzazione geometrica delle parti; è il caso, ad esempio, del rilievo di terrecotte, statue e bassorilievi [fig. 21] o, a tutt'altra scala, del rilievo del terreno, di costoni rocciosi, etc. [fig. 22]. Le facce triangolari delle mesh consentono di simulare l'illuminazione delle superfici, con effetti realistici sorprendenti.

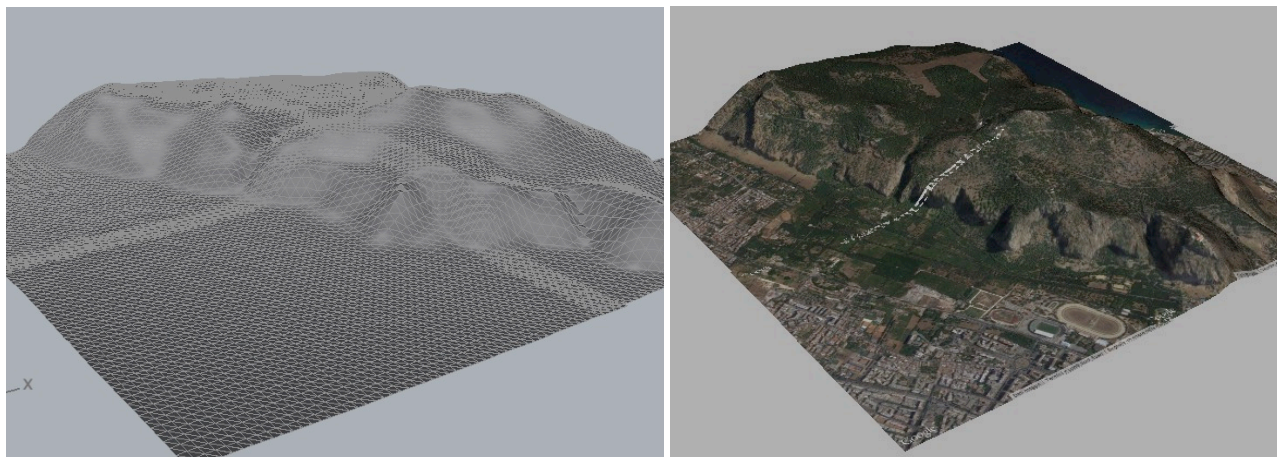


Figura 22; mesh di un'area urbana di Palermo; in evidenza la maglia triangolare della mesh e la mappatura della texture.

L'uso prevalente delle mesh riguarda applicazioni che richiedono una gestione agevole dei modelli (visualizzazione web, fruizione turistica), o ancora la documentazione di deformazioni e alterazioni morfologiche di elementi architettonici (cedimenti strutturali, erosioni dovute ad agenti atmosferici, crolli parziali). La triangolazione dei punti della nuvola che genera la mesh può essere controllata in funzione del grado di accuratezza che si intende raggiungere nella costruzione del modello: una mesh con un maggior numero di superfici triangolari è dotata di maggior grado di dettaglio e si approssima più facilmente alla vera forma della superficie rilevata. La mesh è, per sua natura, omogenea e la sua risoluzione rimane invariata anche quando la complessità geometrica delle superfici varia sensibilmente; nel caso dell'architettura, la mesh risulta pertanto ridondante e difficile da gestire sotto il profilo computazionale. A titolo esemplificativo, la mesh di un ambiente voltato sarà costruita attraverso l'interpolazione di tutti i punti che ne descrivono la superficie visibile; la densità dei triangoli si manterrà omogenea sia per la discretizzazione di superfici piane, sia per la superficie della volta. È evidente che nel caso delle superfici piane (pareti, pavimento), operare una semplificazione dei triangoli che compongono la mesh renderebbe più agevole la gestione del modello; viceversa la superficie della volta richiede una definizione maggiore per via della sua complessità [fig. 23]. Al fine di superare tale limite, sono stati sviluppati algoritmi in grado di determinare il livello di discretizzazione delle superfici in base alla reale complessità geometrica dell'oggetto da restituire; tali algoritmi operano una semplificazione della mesh, modificando la risoluzione dei triangoli sulla base della curvatura o delle discontinuità delle superfici. Tale espediente non risolve ancora il problema dell'interpretazione dei dati, ossia del riconoscimento semantico degli oggetti acquisiti.

Una linea operativa alternativa, sostenuta dagli umanisti, consiste nel sottoporre la nuvola di punti a procedure di discretizzazione, attraverso l'individuazione degli elementi che compongono il manufatto (aperture, apparati decorativi, elementi strutturali e altro ancora) e la costruzione di modelli digitali, detti *analitici*, ossia composti di superfici geometricamente definite; a differenza dei modelli mesh estratti per via semiautomatica, il processo di costruzione di un modello analitico inizia con la discretizzazione delle curve generatrici, per concludersi con la generazione delle parti che andranno a comporre il modello. Tornando pertanto al caso dell'ambiente con copertura a volta, un possibile modello analitico sarebbe costruito rintracciando le curve e le superfici analitiche che ne descrivono la geometria (profili, vele, lunette) [fig. 24]. I modelli analitici, sotto il profilo computazionale, sono sensibilmente più leggeri dei modelli *mesh*, poiché il loro livello di dettaglio è condizionato solo dalla reale complessità degli elementi modellati e non dalla

risoluzione della nuvola di punti. La costruzione di un modello analitico presuppone una definizione semantica degli elementi che vengono rappresentati; il modello digitale è pertanto frutto di un iter critico-cognitivo, volto all'individuazione di matrici geometriche, scelte di progetto, tecniche costruttive, materiali impiegati, apparati simbolici e in generale di ciò che attiene alla caratterizzazione semantica dell'opera.

Per le informazioni che aggiungono alla conoscenza del manufatto, i modelli analitici sono prevalentemente impiegati per indagini sul patrimonio architettonico. Il livello di discretizzazione di tali modelli varia in funzione dell'obiettivo posto dall'indagine e può pertanto riguardare l'intera fabbrica o concentrarsi esclusivamente su porzioni di essa (elementi strutturali, materiali, apparati decorativi).

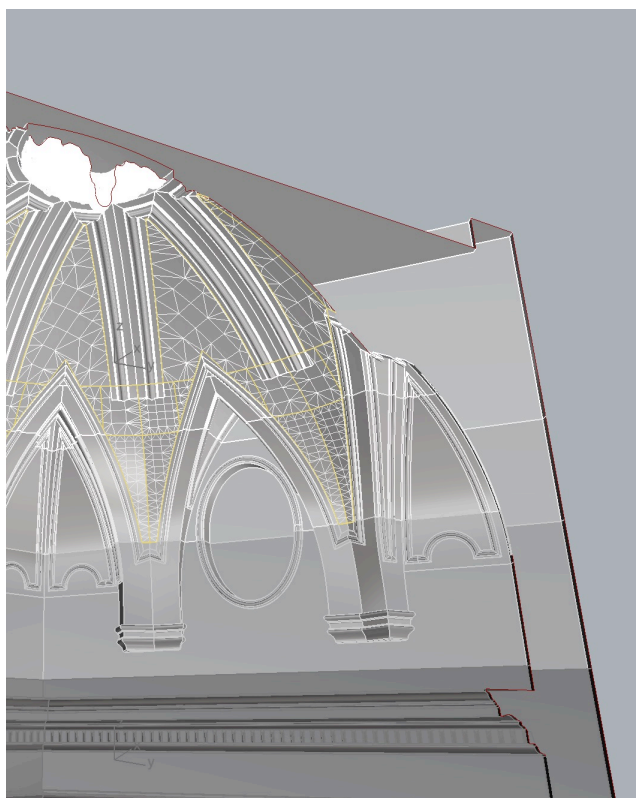


Figura 23; Copertino di Lecce (LE), basilica della Madonna della Neve, modello mesh della volta dell'abside; in evidenza la maglia triangolare della mesh.

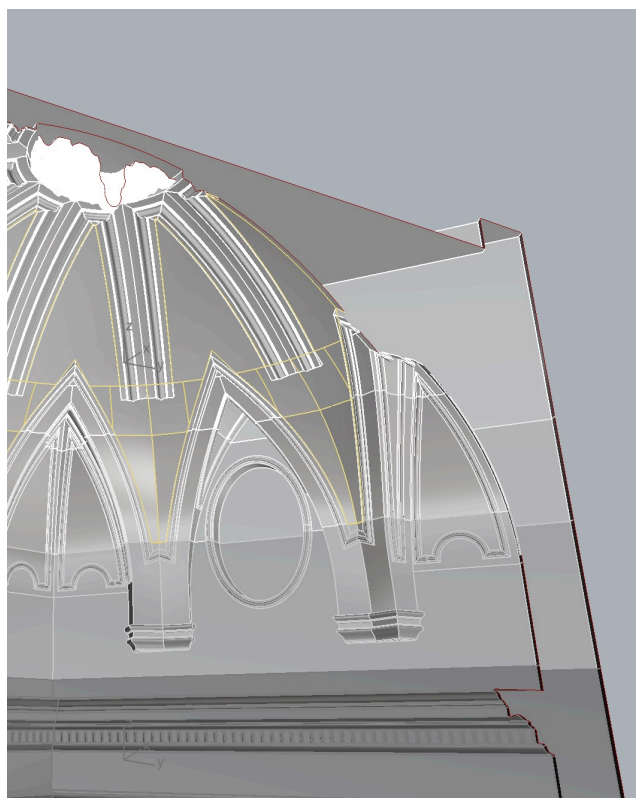


Figura 24; Copertino di Lecce (LE), basilica della Madonna della Neve, modello analitico della volta dell'abside.

3.1.2 Procedure

Le indagini orientate a una codifica metodologica condivisa si avvalgono di procedure e strumenti distinti per le fasi di discretizzazione e costruzione dei modelli. In base al livello di automazione del processo è possibile introdurre una prima classificazione in procedure manuali, semi-automatiche o del tutto automatizzate.

Le procedure di discretizzazione semi-automatiche e automatiche consistono nella suddivisione della nuvola (*point cloud segmentation*)¹¹¹ o dei *pixel* di un'immagine fotografica (*range image segmentation*)¹¹² tramite l'impiego di algoritmi appositamente sviluppati. Il processo di segmentazione consiste nel raggruppare i punti o i pixel in famiglie che condividono le medesime caratteristiche, come, ad esempio, tutti i punti appartenenti a una superficie piana o a curvatura nota. Attualmente la segmentazione automatica riguarda le sole connotazioni formali e cromatiche del manufatto, e l'interpretazione semantica è rimandata alla fase di modellazione vera e propria.

L'incessante progresso che ormai da anni coinvolge tale settore, e la varietà di algoritmi finora sviluppati, rendono ardua la stessa catalogazione delle procedure; come detto, una prima distinzione può essere fatta in funzione del supporto digitale impiegato (nuvola di punti o immagine fotografica):

Point cloud segmentation methods mainly consider geometric properties of scanned objects and exploit geometrical derivatives such as curvature and normals to group points. Colour segmentation of images use colorimetric difference measurements to separate pixels and often follow a partitioning-merging process with a consideration of 2D spatial proximity.¹¹³

Ulteriori distinzioni sono riconoscibili nelle due modalità con cui viene eseguito il *labelling*, ossia la catalogazione delle porzioni della nuvola:

those that segment a point cloud based on criteria like proximity of points and/or similarity of locally estimated surface normals and those that directly estimate surface parameters by clustering and locating maxima in a parameter space.¹¹⁴

Nel primo caso, noto anche come metodo indiretto, il *labelling* avviene impostando preventivamente i criteri con i quali saranno suddivise le porzioni di nuvola; in tal modo la segmentazione è limitata a tutte le porzioni che rispettano tali parametri; se uno di essi prevede, ad esempio, l'individuazione di tutti i punti di una superficie cilindrica, l'algoritmo ricercherà nella nuvola tutte le porzioni approssimabili a tale superficie, tralasciando le regioni in cui tale approssimazione non è applicabile. Dalla combinazione di più parametri è possibile ottenere suddivisioni molteplici.

Le principali procedure di segmentazione indiretta, circoscritte ad un impiego nel settore del patrimonio architettonico¹¹⁵ si basano su: (a) somiglianza tra i colori dei *pixel* e prossimità tra i punti¹¹⁶; (b) individuazione della forma (*shape detection*)¹¹⁷; (c) misurazione della distanza tra facce piane¹¹⁸.

Nel secondo caso, noto anche come metodo diretto, il riconoscimento avviene attraverso l'uso di un algoritmo denominato *Generalized Hough Transform* (GHT)¹¹⁹, in grado di identificare forme complesse in assenza di parametri prestabiliti. In un primo tempo erano individuabili esclusivamente rette e forme semplici (cerchi, parabole); l'algoritmo GHT, sviluppato da Dana H. Ballard¹²⁰ agli inizi degli anni Ottanta, consente di estendere tale riconoscimento anche a forme complesse, non descrivibili analiticamente. L'individuazione delle curve che compongono la figura avviene in forma parametrica e di norma il numero di parametri utilizzati per definire il problema in termini analitici cresce in ragione della complessità delle curve. Il GHT¹²¹ limita il numero di parametri impiegati per il calcolo, suddividendo l'intero processo in due fasi: la prima consiste nella costruzione del modello parametrico della forma da ricostruire, mentre la seconda consiste nell'individuazione vera e propria.

Le segmentazioni semi-automatiche e automatiche hanno il merito di snellire il riconoscimento delle forme, suddividendo la nuvola in parti aventi caratteristiche comuni. Sebbene le prime esperienze siano state condotte su superfici piane, oggi la complessità degli algoritmi e la combinazione di procedure molteplici conduce a esiti soddisfacenti anche con oggetti complessi, pur limitando il campo d'azione alle connotazioni morfologiche. Per tali ragioni le prime applicazioni di segmentazione automatica sono state sviluppate per i settori edile, idraulico e industriale, mentre solo di recente trovano impiego nel rilievo dei beni culturali, con l'utilizzo via via crescente di metodologie di modellazione parametrica nei processi finalizzati alla tutela del patrimonio architettonico.

Alla segmentazione automatica e semiautomatica delle nuvole segue la generazione di modelli mesh nei quali sono ben distinguibili gli elementi architettonici che compongono il manufatto.

Le procedure di discretizzazione manuali prevedono l'estrazione di sezioni notevoli della nuvola di punti attraverso la creazione di piani di taglio opportunamente posizionati; seguono il ridisegno delle sezioni estratte e l'individuazione dei tracciati geometrici fondamentali che regolano la morfologia del manufatto.

L'estrazione di sezioni piane da nuvole di punti è particolarmente efficace per la modellazione di opere d'architettura; il ridisegno delle sezioni consente infatti all'utente di determinare in modo accurato la posizione di spigoli o discontinuità, che non vengono riconosciute come tali durante il processo di scansione né tantomeno nei processi di generazione delle mesh.

La rappresentazione delle superfici digitali avviene seguendo i tracciati matematici individuati e il modello così determinato assume una configurazione geometrica ideale, al netto di eventuali deformazioni, degradi o difformità costruttive.

La costruzione di tali modelli, sebbene richieda tempi maggiori e dipenda in gran parte dalla sensibilità dell'operatore, offre significativi vantaggi:

- mira alla conoscenza delle matrici geometriche del manufatto e alle scelte progettuali operate dall'autore;
- garantisce un controllo costante sulla procedura di discretizzazione attraverso la possibilità di ricondurre l'intera opera ai rapporti armonici e alle medesime unità di misura impiegati nel progetto;
- permette di valutare la distanza tra progetto e dato acquisito;
- permette di valutare deformazioni come scostamenti fra superficie ideale e superficie deformata.

Il processo di discretizzazione manuale consente di organizzare il modello in molteplici livelli semantici, che permettono di raggruppare superfici e solidi oltre che per analogia morfologica anche per categoria (partizioni, coperture, apparati decorativi, materiali), per funzione (strutturale, tamponamento, fondazioni), per epoca storica e per fasi costruttive; tale aspetto attribuisce al modello digitale un corredo di informazioni non desumibili attraverso procedure automatiche.

I moderni software di modellazione permettono la generazione di modelli tridimensionali ibridi, costituiti dall'unione di mesh e di modelli analitici. A titolo esemplificativo, si riportano i modelli di una cappella funeraria decorata da statue [fig. 25.a] e di un contesto ambientale parzialmente edificato interessato da fenomeni franosi [fig. 25.b]; si può osservare che il modello delle statue e del terreno è costituito da mesh, mentre i modelli architettonici sono analitici.

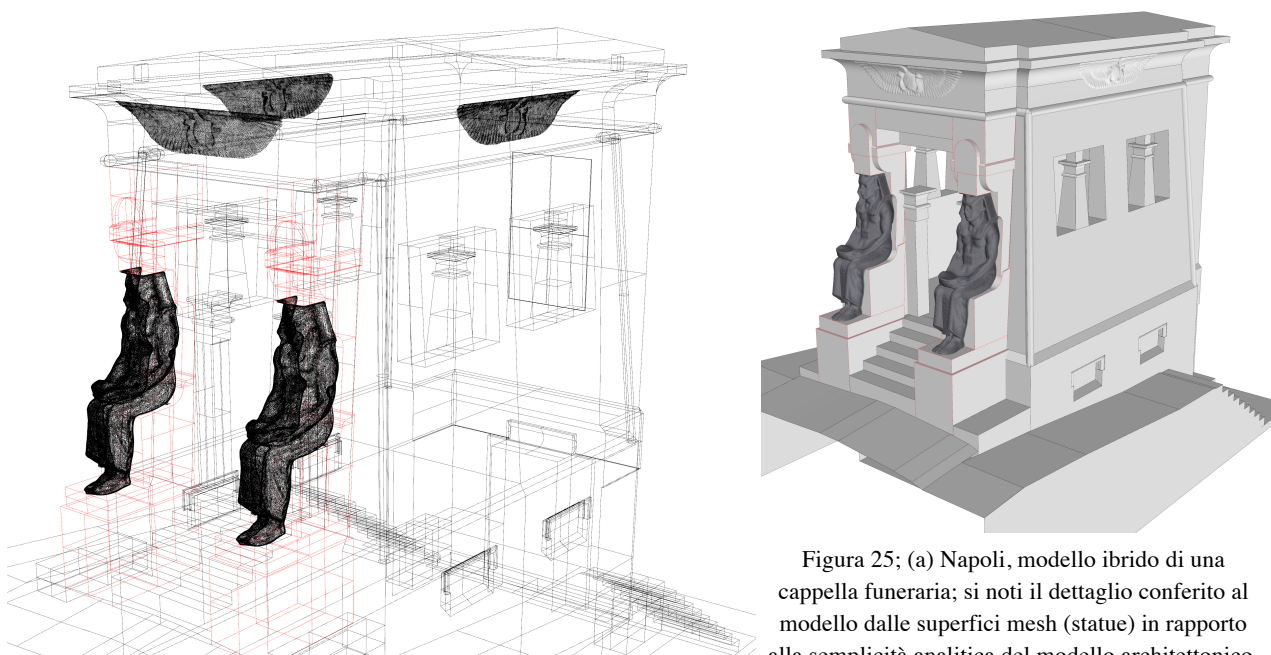


Figura 25; (a) Napoli, modello ibrido di una cappella funeraria; si noti il dettaglio conferito al modello dalle superfici mesh (statue) in rapporto alla semplicità analitica del modello architettonico.

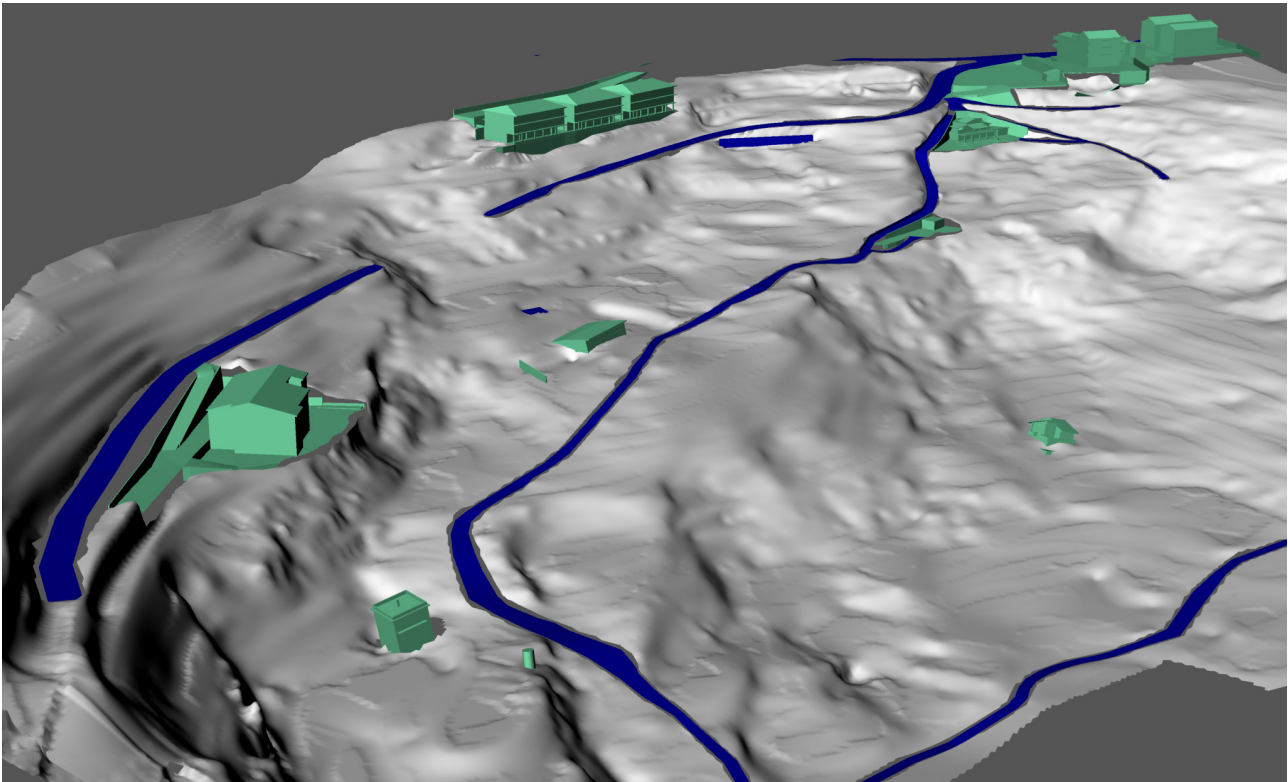


Figura 25; (b) Caronia (ME), modello ibrido di un costone roccioso interessato da eventi franosi.

In una seconda classificazione, proposta in ragione delle tecniche di acquisizione impiegate (*image-based* o *range-based*), si distinguono quattro procedure per la generazione dei modelli:

- Image-based rendering – IBR;
- Image-based modelling – IBM;
- Range-based modelling – RBM;
- Una combinazione di tecniche IBM e RBM.

Tale classificazione è generalmente associata alla generazione di modelli attraverso processi automatici o semi-automatici, ma può ragionevolmente essere applicata ad ogni altro tipo di *output*, come, ad esempio, i modelli analitici.

Le tecniche IBR non sono finalizzate all'estrazione di dati metrici o alla produzione di un modello geometrico tridimensionale; l'*output* di tali procedure è un ambiente virtuale creato per immagini [fig. 26] e organizzato in viste opportunamente collegate tra loro secondo specifiche sequenze¹²²; requisito essenziale di tale procedura è la conoscenza dei punti di presa delle immagini, che sono assunti come punti di stazione dell'ambiente virtuale. Le procedure IBR hanno il vantaggio di produrre ambienti immersivi e leggeri, gestibili attraverso *hardware* comuni e adatti alla visualizzazione web. Affinché il processo conduca a risultati affidabili è necessario che le immagini siano acquisite in modo da garantire un'area di sovrapposizione sufficientemente ampia. Per tale ragione spesso avviene che il manufatto sia documentato in maniera sovrabbondante o che si ricorra a ottiche speciali (obiettivi grandangolari e fisheye).

Le principali applicazioni IBR riguardano installazioni museali, visualizzazioni immersive di ambienti non accessibili, fruizione turistica, *videogaming*. Tali modelli sono facilmente sfruttabili ad integrazione di altre

tecniche di modellazione, come ad esempio, per texturizzare modelli mesh estratti da acquisizioni *laser scanning*, o ancora per produrre viste immersive di modelli virtuali in applicazioni *web-based*.



Figura 26; Minervino (LE), chiesa di San Michele Arcangelo; uno degli ambienti virtuali prodotti attraverso tecniche IBR. Il photo stitching è ottenuto da immagini acquisite con una camera DSLR, dotata di obiettivo 15 mm F2.8 diagonal fisheye e sensore CMOS a pieno formato da 21,1 megapixel. La camera è stata collegata a un treppiede fotografico per mezzo di una testa panoramica Nodal Ninja 3, predisposta con elementi di fissaggio stabiliti in laboratorio. Sono stati acquisiti sette scatti; sei intervallati da un angolo azimutale di 60° e il settimo è ottenuto inclinando verso l'alto la camera di un angolo zenitale pari a circa 90°. Grazie all'utilizzo dell'ottica fisheye, tra uno scatto e l'altro si mantiene una buona zona di sovrapposizione, necessaria per lo stitching. Si ricava così un panorama equirettangolare da 98 megapixel (14000 x 7000 pixel).

Le tecniche IBM permettono di risalire alla configurazione tridimensionale dell'oggetto rilevato attraverso immagini fotografiche e procedure fotogrammetriche. Sebbene tale tecnica conduca indistintamente alla generazione di modelli mesh e analitici, le applicazioni prevalenti riguardano la documentazione del patrimonio artistico e archeologico, trovando maggiore impiego nella documentazione di oggetti di pregio, di opere d'arte che per loro complessità rendono ardua una caratterizzazione geometrica [fig. 27], o ancora degli aspetti materici e cromatici dei manufatti. Per tali applicazioni è generalmente più indicata la produzione di modelli mesh.



Figura 27; Salamanca, Castiglia, Convento de las Duenas; per il rilievo di un capitello sono state eseguite prese fotografiche convergenti, in seguito processate con software fotogrammetrici in modo da desumere un modello mesh su cui proiettare le texture; tale procedura restituisce fedelmente la complessità morfologica e cromatica del capitello pur richiedendo un carico computazionale poco elevato. Dall'alto: individuazione dei punti di presa delle immagini e ricostruzione dei punti omologhi con i quali viene creata una nuvola rada; estrazione della nuvola densa; costruzione mesh e texturing.

Le tecniche RBM si basano sull'impiego di nuvole di punti acquisite da strumenti a sensori attivi. A differenza delle procedure *image-based*, le finalità dello studio determinano in modo considerevole la scelta del tipo di sensore da usare (*close*, *medium*, *long-range*). Come nel caso precedente, anche dai dati *laser scanning* è possibile produrre modelli analitici e mesh; nel settore dell'architettura storica i modelli analitici si prestano maggiormente ad indagini geometriche e alla formulazione di ipotesi ricostruttive. Non mancano tuttavia le applicazioni che conducono alla generazione di mesh per la valutazione di deformazioni e la prefigurazione di interventi conservativi.

L'approccio che più si è diffuso negli ultimi anni, prevalentemente frutto di un adattamento alla natura eterogenea del patrimonio architettonico, riguarda l'integrazione di metodi *image-based* e *range-based*; recentemente le procedure per l'acquisizione e la costruzione dei modelli, e gli apparati strumentali a supporto, si sono evoluti tanto da garantire agli operatori del settore una significativa flessibilità, e una risposta integrata al complesso problema della documentazione dei beni archeologici e monumentali. Tale integrazione si dimostra particolarmente indicata nello studio di architetture complesse, che richiedono diversi gradi di dettaglio e prevedono distinti ambiti di indagine; sebbene la determinazione della sequenza di procedure più consona dipenda dal caso concreto, assai genericamente si può affermare che le tecniche IBM sono prevalentemente impiegate per la documentazione di ambienti semplici ed elementi dotati di una complessa caratterizzazione materica (indagini su affreschi, pitture rupestri, etc.); le tecniche RBM sono generalmente impiegate per la documentazione di elementi di dettaglio e di architetture dalla geometria complessa.

3.1.3 Esperienze

Ripercorrendo brevemente gli esiti di una recente ricerca si potranno meglio chiarire i vantaggi di una interpretazione semantica dei dati acquisiti. Lo studio di seguito proposto¹²³, condotto su alcune fabbriche salentine di età moderna, è incentrato sul rilievo e la modellazione dell'abside della chiesa di San Nicola a Cursi (Lecce), costruita nel XVI secolo [fig. 28].



Figura 28; Cursi (LE), chiesa di San Nicola, esterno e interno dell'abside, vista prospettica del modello digitale.

Già da un'osservazione diretta emerge che la configurazione planimetrica della pianta dell'abside cela un rigoroso quanto complesso impianto geometrico a cinque lobi con nicchie a pianta circolare, ottenuto dalla sapiente combinazione e intersezione di volumi puri. Di particolare complessità è anche la copertura a costoloni del catino, che rivela le profonde conoscenze geometriche e stereotomiche dell'ignoto progettista; la chiave pendula della volta è insolitamente arretrata verso il fondo del catino, spostando il baricentro della composizione e condizionandone, la configurazione geometrica. L'ipotesi che l'impianto planimetrico sia

strutturato secondo una geometria semi-decagonale, fin oggi accreditata dalla letteratura su quest'opera e presumibilmente indotta dalla presenza di cinque lobi nel catino, è stata immediatamente smentita dalla sezione orizzontale della nuvola di punti. Le successive analisi hanno rivelato che tale configurazione è piuttosto riconducibile ad altre matrici geometriche, riferibili ad un unico centro compositivo: la chiave pendula¹²⁴; è stato così possibile riconoscere che l'impianto planimetrico è regolato da un'inedita configurazione ennagonale¹²⁵ [fig. 29]; il taglio determinato dalla crociera della chiesa ha occultato quattro lati dell'ennagono regolare.

La costruzione geometrica ha evidenziato la sostanziale congruenza tra i vertici del poligono e gli elementi architettonici che ne scandiscono la partizione (colone, speroni etc.); il baricentro della figura è stato rintracciato sulla proiezione della chiave e le congiungenti tra tale punto e i vertici hanno restituito le proiezioni orizzontali dei costoloni, confermando pertanto l'ipotesi di un impianto centrico.

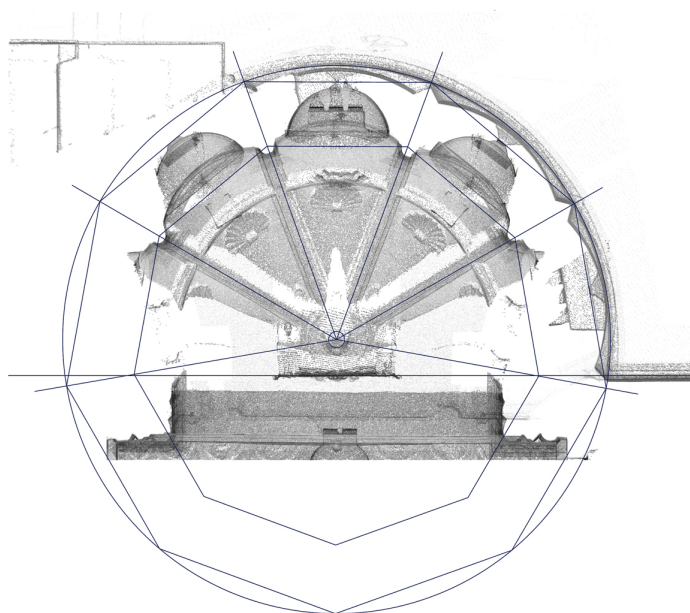
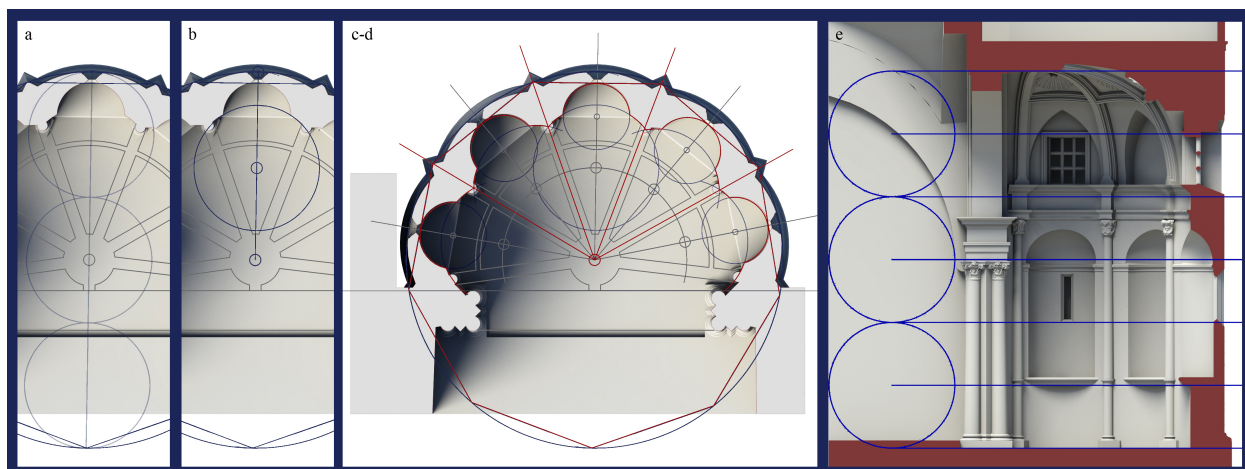


Figura 29; Corsi (LE), chiesa di San Nicola, vista superiore della nuvola di punti e individuazione dell'ennagono regolare, concentrico alla circonferenza che descrive il perimetro esterno dell'abside. Le diagonali convergono verso la chiave pendula.

Si notino inoltre l'esatta corrispondenza tra le diagonali dell'ennagono e le proiezioni dei costoloni, e la traiettoria circolare descritta dalla proiezione dei *nervios combados*.

Rintracciata la geometria che regola l'impianto planimetrico, l'analisi dei rapporti armonici tra i singoli elementi architettonici in pianta e in alzato, ha consentito di osservare che il dimensionamento della fabbrica è riconducibile al diametro della circonferenza che inscrive l'intero catino absidale [fig. 30].



. Figura 30; Corsi (LE), chiesa di San Nicola, rapporti armonici rintracciabili in pianta e in alzato: (a) pianta, particolare, suddivisione in tre parti del diametro complessivo; (b) pianta, particolare, posizionamento della circonferenza della polilobata; (c,d) pianta, individuazione delle matrici geometriche che regolano l'impianto planimetrico; (e) alzato, individuazione delle partiture orizzontali.

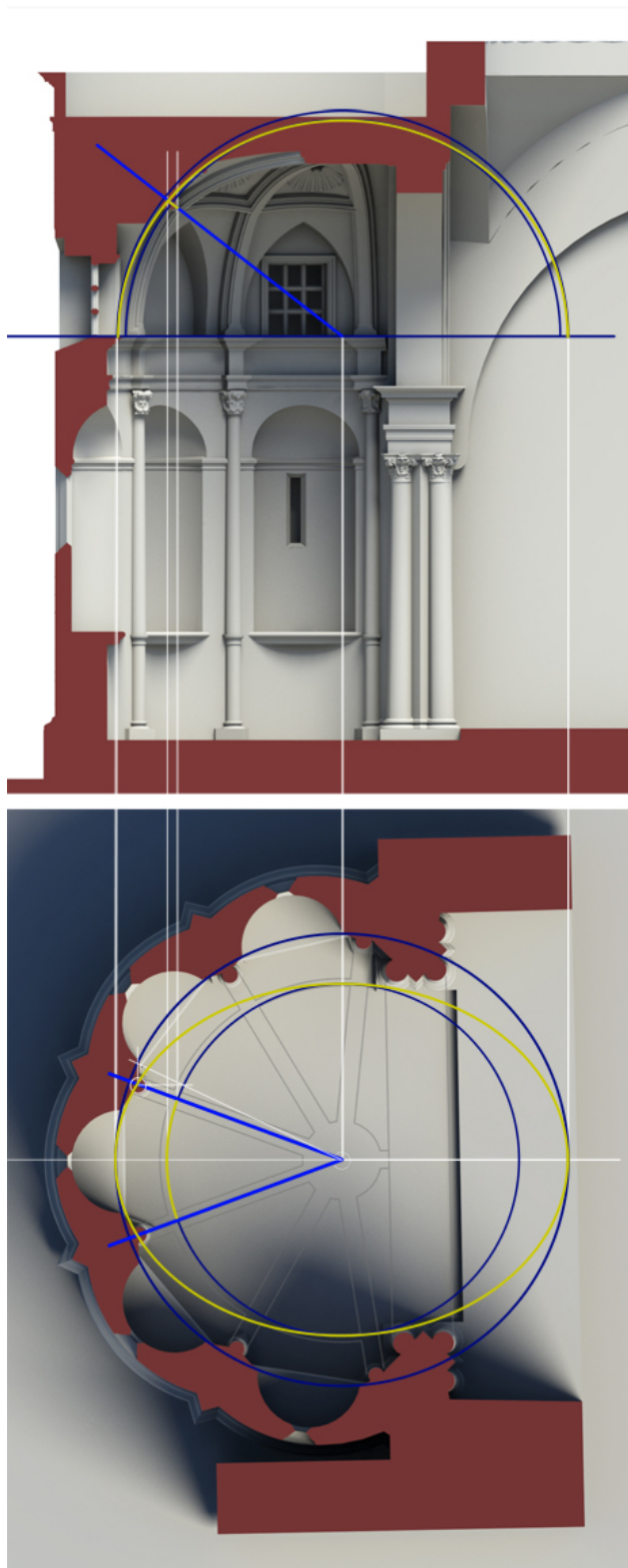


Figura 31; Corsi (LE), chiesa di San Nicola, ipotesi ricostruttiva del progetto per la calotta: costruzione delle ellissi in doppia proiezione attraverso il metodo delle circonferenze concentriche e individuazione della giacitura dei nervios combados attraverso il metodo della doppia proiezione

Oltre alle implicazioni di matrice geometrica, l'indagine ha permesso di ricostruire il processo progettuale attraverso cui l'abside è stata concepita in pianta e in alzato. Dallo studio dell'insolita calotta “a spicchio d'arancia”¹²⁶, suddivisa orizzontalmente da una ancor più insolita fascia di costoloni, meglio noti in ambiente iberico come *nervios combados*, è emerso che la superficie che meglio discretizza il sistema strutturale a costoloni della cupola è una porzione di ellissoide, costruita secondo precise condizioni di proporzionalità¹²⁷. Naturalmente il progetto della calotta, nella sua straordinaria complessità tridimensionale, doveva essere inevitabilmente ricondotto ad un più semplice problema di doppia proiezione [fig. 31], metodo senz'altro noto al progettista e presumibilmente impiegato anche in fase costruttiva dai maestri del cantiere.

Da questo esempio è evidente il ruolo che assume la discretizzazione dei dati nella conoscenza dei processi progettuali e costruttivi sottesi all'architettura storica. Sebbene infatti il livello di automazione raggiunto oggi nell'acquisizione e segmentazione dei dati sia stato perfezionato al punto da potersi ritenere soddisfacente, gli sforzi prodotti per ridurre la componente umana nel processo interpretativo non hanno tuttora condotto ad esiti significativi; in buona parte ciò è dovuto all'eterogeneità degli impieghi di un modello e alle infinite implicazioni in termini di discretizzazione e di livello di dettaglio. Ma in maniera assai più determinante, la principale difficoltà nell'applicazione di tali procedure risiede nell'incapacità dei software di sostituirsi all'uomo nel riconoscimento di elementi tipologici, geometrici e semantici. Nell'ambito dei beni culturali, l'elevata complessità geometrica degli elementi, le sue possibili declinazioni linguistiche in architetture coeve e le consuete alterazioni subite nel tempo, introducono un tale numero di variabili nel processo interpretativo, da rendere pressoché insostituibile l'intervento di una componente critica.

È parere di chi scrive che – sebbene allo stato dell'arte i progressi in ambito informatico siano ben lontani dal proporre una procedura di riconoscimento semantico gestita interamente da algoritmi – in alcuni casi, una valida integrazione tra processi automatici e interpretazione umana

possa agevolare la costruzione dei modelli per l'architettura. Con le procedure automatiche il processo è orientato a un riconoscimento morfologico che, in maniera più o meno dettagliata e controllabile, consente l'approssimazione del modello numerico a entità geometriche fondamentali; tale processo nulla aggiunge alla conoscenza del manufatto. La stessa correlazione tra le parti attraverso moduli e rapporti armonici è molto limitata.

L'interpretazione dei dati del rilievo – che conduce all'individuazione di schemi di relazioni tra le parti, del modulo impiegato per il dimensionamento o delle geometrie che ne governano gli spazi e il modo di percepirli – consente di acquisire informazioni non desumibili automaticamente e giungere alla ricostruzione del progetto della fabbrica.

3.2 Strumenti e procedure per la costruzione di modelli analitici

Lo schema di relazioni tra le parti, regole geometriche e strategie progettuali individuate con la discretizzazione dell'opera, richiede ancora di essere rappresentato attraverso la costruzione di modelli coerenti, in grado di operare la necessaria semplificazione. I grafici bidimensionali (piante, sezioni), ampiamente usati per il loro alto grado di astrazione, costituiscono validi strumenti per la rappresentazione. Tuttavia, nei casi più complessi, è ormai sempre più frequente il ricorso a modelli tridimensionali, che favoriscono una percezione del modello del tutto analoga alla vista umana, e permettono di esaminare le caratteristiche spaziali di un'opera in un solo elaborato.

Nell'ambito della modellazione tridimensionale, gli strumenti per il disegno si sono enormemente evoluti al fine di garantire una certa versatilità, trovando il giusto compromesso tra accuratezza geometrica e disegno *free-form*. Questa versatilità, peraltro piuttosto recente, è dovuta a diversi decenni di ricerca e sperimentazione sullo sviluppo di idonee formulazioni matematiche delle curve e di software in grado di garantirne una semplice e intuitiva applicazione. Se la rappresentazione di rette e curve convenzionali è relativamente semplice, poiché guidata dalla trasposizione parametrica delle note formule analitiche che ne regolano le traiettorie, nel caso di curve *free-form* la soluzione al problema è assai più complessa.

Per la verità, questa esigenza era già divenuta pressante in occasione della Seconda Guerra Mondiale, specie nel settore dell'aeronautica militare; i primi tentativi di descrivere numericamente delle curve, infatti, erano stati condotti dall'ingegnere statunitense Roy Liming¹²⁸, che ideò un metodo per la trasposizione numerica delle forme degli aeroplani, limitando sensibilmente gli errori di interpretazione e graficismo possibili con l'impiego di disegni tracciati a mano.

Con i medesimi propositi, nel 1958, la casa automobilistica francese Citroën assumeva un giovane matematico, Paul de Faget de Casteljau, al quale veniva assegnato il compito di riprodurre in digitale i cianotipi delle *silhouette* delle auto¹²⁹. La complessità di tali profili, che non permetteva, fino ad allora, una rappresentazione secondo principi geometrici, spinse de Casteljau a sviluppare un metodo di costruzione analitica delle curve, basata sull'uso di *courbes à pôles* (curve a poli)¹³⁰. L'intuizione di de Casteljau consisteva nel definire una progressione di punti di controllo consecutivi, non direttamente situati sulla curva bensì esterni ad essa e in grado di influenzarne la traiettoria attraendo o respingendo le porzioni di curva più prossime senza alterarne la continuità; il poligono che congiunge tali punti è denominato *poligono di controllo* della curva. Naturalmente lo stesso procedimento può essere impiegato per la rappresentazione di superfici complesse, per le quali il poligono di controllo sarà costituito da un reticolo tridimensionale di punti. L'algoritmo di de Casteljau rimase per anni protetto dalle politiche aziendali della Citroën¹³¹, mentre, a pochi chilometri di distanza, un ingegnere della Renault, il francese Pierre Bézier, codificava una nuova famiglia di curve complesse; anche le sue curve, note come curve di Bézier, erano gestibili da due o più punti di controllo, ma mantenevano una genealogia indipendente [fig. 32]:

Bézier's initial idea was to represent a "basic curve" as the intersection of two elliptic cylinders [...]. The two cylinders were defined inside a parallelepiped. Affine transformations of this

parallelepiped would then result in affine transformations of the curve. Later, Bézier moved to polynomial formulations of this initial concept and also extended it to higher degrees. The result turned out to be identical to de Casteljau's curves, only the mathematics involved was different. A member of Bézier's team, D. Vernet independently developed the de Casteljau algorithm.¹³²

Le curve di Bézier sono in grado di interpolare i punti di controllo iniziale e finale e approssimare quelli intermedi; il comportamento delle curve dipende infatti da funzioni analitiche¹³³ già impiegate da de Casteljau per la formulazione del suo algoritmo. Per maggiore chiarezza si riporta di seguito la formulazione analitica delle curve di Bézier¹³⁴; dati $n+1$ punti (p_0, p_1, \dots, p_n) nello spazio (punti di controllo), la curva di Bézier $p(u)$ è definita come segue:

$$p(u) = \sum_{i=0}^n B_{n,i}(u) \cdot p_i$$

con $u \in [0,1]$

in cui i coefficienti di Bézier (ossia i polinomi di Bernstein) sono definiti come segue:

$$B_{n,i}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i}$$

Il punto che corrisponde a u sulla curva di Bézier è la *media pesata di tutti i punti di controllo*, i cui pesi sono definiti dai coefficienti $B_{n,i}(u)$; l'unione dei punti p_i determina il *poligono di controllo* [fig. 33].

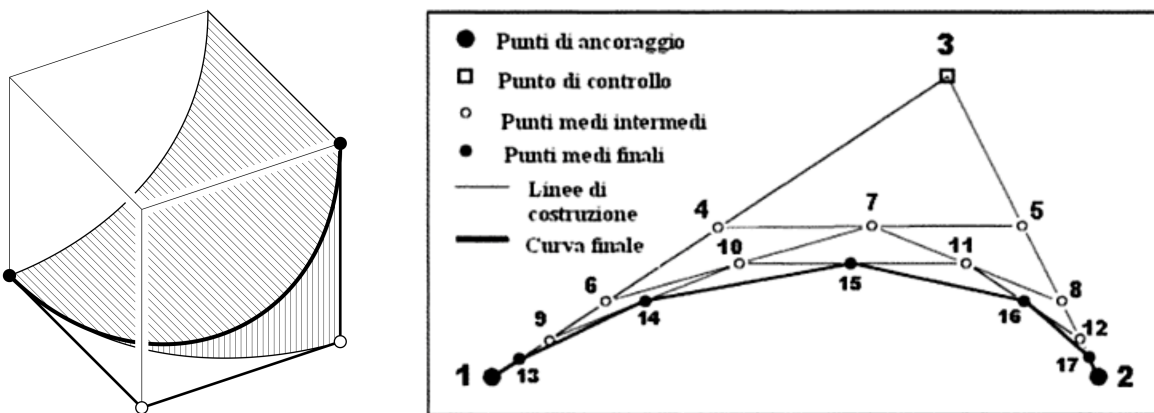


Figure 32-33; sinistra: rappresentazione della “curva base” di Bézier attraverso l’intersezione di due cilindri a sezione ellittica racchiusi in un parallelepipedo limite; la deformazione della curva avviene deformando il parallelepipedo limite dai vertici (FARIN, HOSCHEK, KIM, 2002, op. cit., p. 7); destra: costruzione grafica della curva di Bézier (SALA, SALA, 2005, op. cit., p. 95).

L’interesse per le ricerche di Bézier condusse, nel 1972, allo sviluppo di un sistema CAD/CAM¹³⁵, denominato UNISURF, basato sull’impiego di tali curve e in grado di prototipare le superfici delle carrozzerie delle auto direttamente dai modelli matematici sviluppati sui calcolatori, abbandonando quindi gli antichi sistemi di prototipazione manuale. All’UNISURF segue il sistema EVE della compagnia aerea *Dessault Aviation*, usato per la realizzazione delle carrozzerie degli aerei, che successivamente viene ulteriormente sviluppato e rinominato CATIA¹³⁶ (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*).

Sul fronte della rappresentazione tridimensionale, alla fine degli anni Sessanta possono ricondursi le prime rudimentali esperienze di modellazione, basate sulla generazione di poliedri attraverso l’unione di superfici poligonali; qualche anno più tardi, nel 1973, gruppi di ricerca afferenti a tre distinte università¹³⁷, sviluppano

autonomamente nuovi strumenti per la creazione e gestione di solidi; tale procedura innovativa, denominata *solid modeling* e rapidamente diffusasi in ambito accademico, avvia un periodo di costanti innovazioni negli ambiti del *Computer Aided Design* (CAD)¹³⁸ e della *Computer Vision*.

Due distinte tecniche definiscono le modalità di costruzione e modifica dei solidi codificate in quegli anni: la *Constructive Solid Geometry* (CSG) è una tecnica *volume-based* nella quale il solido è definito attraverso l'uso di *primitive*¹³⁹; per mezzo di alcune procedure, note come *operazioni booleane* (addizione, sottrazione, intersezione tra solidi), è possibile combinare tali primitive in un sistema piramidale, definito *albero delle primitive*, alla cui estremità si trova la configurazione finale del solido.

La *boundary representation* (B-rep) è invece una tecnica *edge-based* che permette di definire i solidi attraverso i contorni delle singole facce, assimilabile ad una rappresentazione *wireframe* (vertici, bordi e spigoli). Oltre alle comuni operazioni booleane, la costruzione dei solidi avviene attraverso la combinazione di altre operazioni come l'estrusione, la smussatura, il taglio etc.

Dopo una rapida diffusione nel settore industriale e aerospaziale, tra gli anni Settanta e Ottanta lo sviluppo del *solid modeling* investe anche il ramo della progettazione architettonica e ingegneristica tramite la diffusione dei primi sistemi di rappresentazione tridimensionale integrati al CAD bidimensionale; l'integrazione delle curve di Bézier nei modellatori CAD ha ampliato a dismisura le possibilità offerte dai nuovi *tools*; nonostante gli evidenti e rapidi sviluppi, i *tools* evoluti, così come i primi prototipi, erano prevalentemente rivolti alla rappresentazione del progetto, relegando ad un ruolo secondario la gestione dei processi costruttivi¹⁴⁰. Sempre negli anni Settanta viene sviluppata la parametrizzazione di altre tipologie di curve *free-form*, il cui impiego era già ampiamente consolidato, seppur in modo empirico: le *B-spline* e le *NURBS*.

Le *B-splines* (*Basis Splines*), definite parametricamente da Riesenfeld e Gordon¹⁴¹ nel 1974, derivano da più generiche curve *free-form*, per secoli tracciate manualmente tramite l'uso di uno strumento, lo *spline*, che modifica la traiettoria della curva descritta da una fascia flessibile di legno posizionando su di essa dei pesi [fig. 34]; tali curve erano largamente impiegate già in epoca Romana nel progetto degli scafi delle imbarcazioni, e nei secoli successivi dagli armatori veneziani per definire le geometrie della chiglia delle navi attraverso le tangenti agli archi. La trasposizione parametrica di tale processo, del tutto simile a quello impiegato per le curve di Bézier¹⁴², permette di tracciare e gestire queste curve in ambiente CAD. Lo sviluppo di tali nuove curve è dovuto ad un particolare limite delle curve di Bézier: queste ultime infatti, non potevano essere modificate localmente attraverso i punti di controllo; la loro formulazione polinomiale prevedeva infatti che, ad ogni variazione di un singolo punto di controllo venisse modificata la giacitura dell'intera curva. La formulazione delle B-spline consente di superare tale limite, circoscrivendo l'azione del punto di controllo ad una singola porzione della curva, e assumendo quindi una natura *locale*. I raccordi tra le porzioni di curva influenzate da punti di controllo distinti sono comunemente noti come *knot*. Le B-spline possono essere di due tipi, e la loro classificazione dipende dalla distanza tra *knot*; se l'intervallo tra due *knot* rimane costante per l'andamento di tutta la curva, quest'ultima è definita B-spline uniforme; viceversa è non uniforme.

Nonostante la loro estrema versatilità, le B-spline, nella forma parametrica polinomiale, non sono adatte a definire geometrie semplici come le coniche; per tale ragione, una nuova generalizzazione ha condotto alla definizione di un'altra famiglia di curve (e poco dopo di superfici con le medesime caratteristiche): le *NURBS* (*Non-Uniform Rational B-Splines*), in grado di rappresentare indistintamente B-splines e coniche. Il principio di funzionamento di tali curve, assunte ben presto come standard nei principali software di modellazione CAD, consiste ancora una volta nella capacità di razionalizzare (in forma polinomiale) le curve per singole porzioni collegate da *knot* e di tracciare profili chiusi. Trattandosi di curve non uniformi, gli intervalli tra *knot* sono variabili, e ciò conferisce alla curva una certa versatilità.

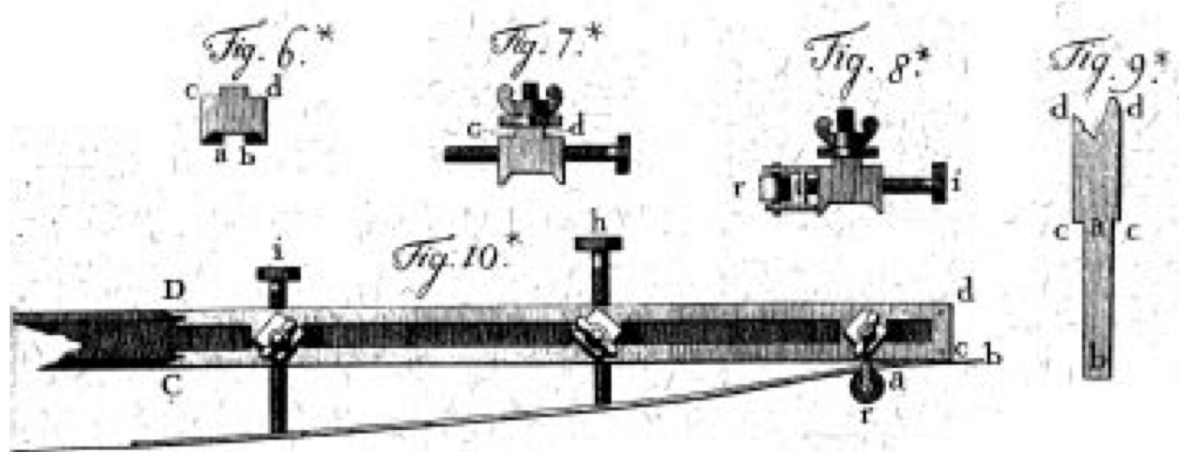


Figura 34; rappresentazione di uno *spline* meccanico del XVIII secolo (FARIN, HOSCHKEK, KIM, 2002, op. cit., p. 2).

Le NURBS sono definite per mezzo di tre principali caratteristiche: il *grado*, i *punti di controllo*, la *sequenza di nodi*. Il *grado*, numero intero positivo (variabile in genere da 1 a 5), distingue fra loro le curve lineari (linee e polilinee), le quadratiche (cerchi e archi di circonferenza) e le cubiche e *quintiche* (curve *free-form* planari e nello spazio). I *punti di controllo*, in numero pari a (grado + 1), sono caratterizzati da un valore numerico solitamente positivo, che ne indica il “peso”; nelle curve non razionali il peso è identico per tutti i punti di controllo, mentre varia nelle curve razionali¹⁴³. La *sequenza di nodi*, in quantità pari a (grado + punti di controllo - 1), è nota anche come *vettore dei nodi* e precisa la definizione parametrica della curva.

Da queste tipologie di curve è possibile generare superfici dalle analoghe caratteristiche; nel caso delle NURBS, pertanto, la versatilità che le contraddistingue consente la generazione di superfici semplici, come le coniche, e complesse, come quelle *free-form*, chiuse o aperte, e gestibili da un reticolo di punti di controllo che ne consente una modifica locale. Infine, se opportunamente tracciate, le superfici NURBS possono essere unite a formare un unico oggetto solido (se chiuso) o una polisuperficie (se aperta).

Il primo sistema di modellazione che integra le NURBS è un applicativo, denominato Tiger, sviluppato dalla Boeing nel 1979 per l'industria aeronautica. In breve tempo la maggior parte dei sistemi CAD si è dotata di strumenti per la costruzione e gestione di tali curve, mentre nuovi modellatori tridimensionali, basati esclusivamente sulla combinazione di superfici NURBS¹⁴⁴, sono stati sviluppati dalle principali *softwarehouse* al fine di offrire all'utente maggiore autonomia nel disegno bidimensionale e nella modellazione 3D.

Progressi significativi sono stati compiuti nell'ambito del *reverse engineering*; molti software che sfruttano le proprietà delle NURBS sono stati dotati di strumenti per l'importazione e la gestione di nuvole di punti; in tal modo è possibile generare modelli analitici degli oggetti acquisiti, operando la discretizzazione delle parti dell'oggetto registrato e ricostruendo le superfici analitiche che ne rappresentano la forma. Nei casi più semplici il modello è costruito generando le sole superfici visibili dell'oggetto e unendo queste ultime in un'unica polisuperficie complessa. A seconda delle finalità dell'indagine e della complessità dell'oggetto, può essere necessario organizzare le superfici rappresentate per livelli, a cui è assegnata una particolare caratteristica (materiale, rugosità, capacità di riflettere la luce, etc.), o ancora suddividere il modello in solidi autonomi sui quali condurre analisi separate (è il caso di indagini statiche etc.).

3.3 Modelli parametrici

Alla fine degli anni Ottanta vengono sviluppati strumenti alternativi al CAD, che si basano sull'uso di procedure di modellazione parametrica, nelle quali ogni oggetto non è definito esclusivamente in termini formali, bensì da un insieme di parametri e definizioni geometriche organizzate in modo gerarchico; tali parametri consentono di modificare e aggiornare automaticamente le caratteristiche dell'oggetto (dimensioni, giaciture, distanza da altri oggetti e condizioni di parallelismo) in base alle scelte operate dagli utenti o ai cambiamenti del contesto.

Queste definizioni geometriche sono tra loro integrate in maniera non ridondante e non consentono incongruenze tra il modello e l'insieme dei dati ad esso associati. Questo significa che ad ogni cambiamento fatto direttamente nel modello corrisponde un uguale cambiamento nell'insieme dei dati ad esso associati e viceversa.¹⁴⁵

Nell'ambito della modellazione architettonica, i modellatori parametrici contengono un database precaricato di oggetti raggruppati in famiglie, distinte per tipologia (famiglie muro, finestra, solaio) e funzione (finiture, tamponamenti, elementi strutturali). Tali famiglie consentono la creazione di una qualsiasi quantità di oggetti, le cui forme e dimensioni dipendono dai parametri specificati dall'utente e dalle relazioni stabilite con gli altri oggetti. Naturalmente è possibile arricchire tali famiglie creando nuovi oggetti personalizzati tramite modellatori CAD integrati nei software parametrici, che, una volta inseriti nei database di tali software, possono essere impiegati in ogni altro modello senza la necessità di ricostruirli integralmente. Il nuovo oggetto, definito attraverso l'acronimo BEM (*Building Element Model*), può quindi essere editato attraverso la modifica dei suoi parametri. A titolo esemplificativo si considerino due modelli NURBS e parametrico di un infisso [fig. 35]: il primo sarà creato costruendo le superfici geometriche che lo compongono, tenendo conto della dimensione prefissata del varco sul muro; ogni variazione di tali dimensioni o delle caratteristiche tecnologiche (vetro, profilo) dovrà essere riportata manualmente sul modello. Nel caso del modello parametrico, la famiglia "infisso" è già stata predisposta in modo da contenere i parametri analitici che ne caratterizzano dimensioni e prestazioni; pertanto, è possibile modificare la geometria dell'oggetto o le sue dotazioni tecnologiche semplicemente modificando tali parametri. Tali modifiche hanno effetto anche sugli oggetti collegati all'infisso, come ad esempio, le dimensioni del varco sul muro e così via. Da ciò è evidente che la modellazione parametrica contribuisce a ridurre sensibilmente i tempi di costruzione dei modelli; tuttavia, gli oggetti complessi o non ancora inseriti nelle librerie dei software richiedono la creazione di nuove famiglie parametriche *ex novo*.

Nel corso degli ultimi venticinque anni, numerosi sono stati i progressi compiuti con la modellazione parametrica; l'impiego prevalente di tali software è avvenuto nel settore dell'edilizia, grazie alla possibilità di collegare gli oggetti tridimensionali a informazioni non specificamente connesse alla sola forma geometrica, procedendo per livelli sovrapposti; le procedure di modellazione e i software che consentono tali link sono comunemente detti BIM (*Building Information Modeling*); il BIM nasce come applicazione nel campo della meccanica e si evolve come strumento di gestione per progetti architettonici complessi, come risposta alla necessità di gestire le fasi di lavoro e i soggetti coinvolti nella costruzione; le informazioni collegabili possono essere di vario genere e formato, includere target geo-referenziati, modelli di calcolo, informazioni sui materiali, analisi dei degradi. Viene quindi generato un modello/contenitore, aggiornabile e condivisibile secondo usi anche non inizialmente previsti. Le numerose e più recenti esperienze maturate in ambito scientifico e professionale sono finalizzate alla gestione del progetto architettonico nel tempo, quindi anche dopo la sua realizzazione, al controllo delle prestazioni energetiche dell'edificio e alle analisi dei costi di produzione, gestione e manutenzione.

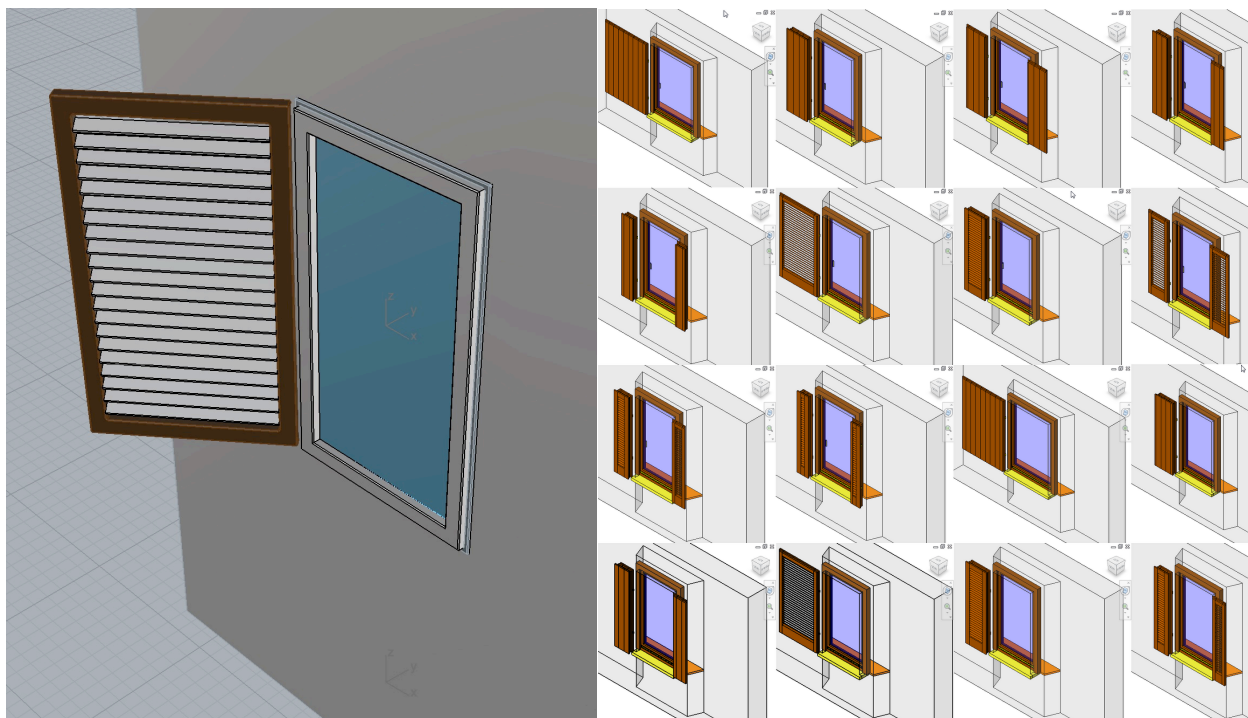


Figura 35; modello NURBS (McNeel Rhinoceros) e modello parametrico (Autodesk Revit) di un infisso.

Una nuova funzione introdotta nei modellatori BIM a partire dal 2007 permette la definizione dello spazio architettonico: a differenza dei sistemi CAD, che definiscono lo spazio implicitamente attraverso la costruzione degli elementi perimetrali (solai, muri), i modellatori BIM identificano e derivano gli spazi direttamente dal modello tridimensionale, in modo da calcolarne automaticamente superfici e cubature. Recentemente, le principali case produttrici di complementi per l'edilizia hanno avviato la diffusione dei BEM dei loro prodotti in modo da consentirne l'impiego ai professionisti durante la progettazione.

Uno tra i più approfonditi profili sui software di modellazione parametrica è redatto da Chuck Eastman nel suo volume sul BIM¹⁴⁶; in questa sede si ripoterà una breve sintesi dedicata alle salienti caratteristiche dei software BIM più diffusi sul mercato.

3.3.1 Apparati strumentali

Autodesk Revit è il più conosciuto e diffuso tra i software BIM e include i moduli per la progettazione architettonica, strutturale e impiantistica; include inoltre moduli per la valutazione delle prestazioni energetiche e un potente motore di gestione dei protocolli di scambio dati; l'interfaccia Autodesk ne semplifica l'apprendimento e l'utilizzo; consente l'importazione da, e l'esportazione verso i principali software di disegno CAD e modellazione NURBS attraverso i numerosi formati di interscambio supportati (tra cui DWG, DXF, IFC) e permette di trasferire i modelli prodotti a moduli di calcolo strutturale come *Autodesk Robot Structural Analysis*; le principali debolezze risiedono nella gestione dei modelli tramite una memoria locale, che ne rallenta notevolmente le capacità computazionali per modelli complessi, e l'incapacità di gestire superfici a curvatura complessa. Di recente è stata introdotta la possibilità di importare le acquisizioni *laser scanning* direttamente nell'ambiente di lavoro.

Bentley Systems integra un insieme di *tools* di modellazione parametrica dedicati ai diversi ambiti della progettazione (*Bentley Architecture*, *Bentley Structural*, *Bentley Mechanical Systems* etc.); tali sistemi registrano su disco i modelli creati dall'utente (*file-based systems*) aumentando la rapidità di risposta del software e gestendo agevolmente anche superfici complesse come NURBS e Bézier; uno specifico plug-in di modellazione parametrica, denominato *Generative Components*, consente la definizione di oggetti

parametrici dalla geometria complessa. I principali limiti di tale sistema sono un'interfaccia poco intuitiva e le difficoltà riscontrate nel trasporto dei modelli da una piattaforma all'altra. Anche *Bentley Systems* consente di gestire le acquisizioni *laser scanning* attraverso il software *Pointools*, acquisito nel 2011; una serie di plug-in *Pointools* per la gestione delle nuvole di punti sono stati sviluppati anche per gli altri modellatori BIM.

Graphisoft ArchiCAD è uno tra i primi software BIM commercializzati; l'ultima *release* (ArchiCAD 19) consente di caricare i progetti in *cloud*, condividerli via server in tempo reale con i soggetti interessati, visualizzarli e modificarli anche tramite dispositivi portatili (tablet e smartphones). Infine è stata sviluppata un'interfaccia destinata anche ai non addetti ai lavori, che consente la visualizzazione interattiva del modello e dei dati ad esso associati con un'interfaccia altamente intuitiva. Negli ultimi anni è stato integrato un buon modellatore *free-form* denominato *Morph tool*, anche se alcuni limiti sono riscontrabili nella modellazione parametrica. La possibilità di importare e gestire nuvole di punti è spesso demandata a plug-in esterni, come il già citato *Bentley Pointools*.

Altri software basati sulla modellazione parametrica sono *Digital Project™ Gehry Technology*, *Nemetschek Allplan* e *Tekla Structures*. Infine sono stati recentemente sviluppati plug-in dedicati, che, integrandosi a modellatori CAD e NURBS, consentono di trasformare i modelli geometrici generati da tali software in modelli parametrici; tale approccio, è particolarmente utile alla documentazione del patrimonio architettonico per la capacità di gestire agevolmente modelli complessi e superfici *free-form*, ma mantiene tuttora limiti nella conversione in oggetti parametrici.

Più recentemente si assiste a un'inversione di tendenza nei processi di integrazione tra software BIM e software di modellazione; se fino a poco tempo fa la ricerca di integrazione appariva come una necessità dei soli software BIM, che venivano progressivamente dotati di strumenti di modellazione sempre più avanzati e complessi, oggi gli sviluppatori di software NURBS integrano plug-in in grado associare informazioni parametriche agli oggetti modellati. Le procedure, tutt'oggi in costante sviluppo, prevedono l'introduzione di comandi parametrici semplici, come le comuni entità *muro*, *finestra*, *scala* etc. e tentano di offrire una soluzione al problema della modellazione parametrica di elementi complessi permettendo la conversione di tali entità matematiche in entità parametriche. L'esportazione dei modelli digitali in formato IFC, protocollo di scambio standard per il BIM, consente di associare ad ogni oggetto o layer uno specifico *tag* che ne descrive il comportamento parametrico. In tal modo, oggetti creati da superfici NURBS e dalle geometrie complesse possono essere facilmente convertiti in oggetti parametrici. Fino ad oggi, uno dei principali plug-in commerciali che consente tale conversione è *VisualArq©* per *McNeel Rhinoceros©*. È inoltre presumibile che nell'immediato futuro, tale tipo di funzione venga integrata nei principali software di modellazione NURBS e CAD.

3.4 Dal BIM all'*Historic BIM*

Per anni, il settore AEC (*Architecture, Engineering, Construction*) è stato connotato da una sostanziale distinzione tra gli strumenti impiegati per la progettazione e la nuova costruzione e quelli relativi alla documentazione del patrimonio architettonico; se nel caso di nuova costruzione, infatti, il *Building Information Modeling* si è largamente diffuso fin dai suoi esordi, nel caso del patrimonio architettonico, si è registrato un impiego prevalente di modellatori CAD e NURBS, data la maggiore flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse.

L'applicazione delle tecniche BIM anche al patrimonio esistente ha aperto di recente un canale d'indagine inedito, che tenta di trasferire i vantaggi offerti dalla modellazione parametrica alla documentazione e tutela

del patrimonio culturale; tale nuovo approccio prende il nome di *Historic Building Information Modeling* (HBIM).

Le prime esperienze condotte in questo campo hanno risentito della mancanza di idonei strumenti di modellazione, registrando difficoltà operative in funzioni essenziali come l'importazione e la gestione delle nuvole, la creazione e la manipolazione di geometrie complesse, la conversione dei modelli per l'impiego in diverse piattaforme. Naturalmente queste lacune iniziali sono dovute alla finalità con cui i software BIM sono stati concepiti, ossia un uso prevalente nel settore delle nuove costruzioni, ma la diffusione di un impiego non convenzionale e la crescente attenzione per il *Cultural Heritage Recording* da parte di amministrazioni e enti di ricerca sta progressivamente spingendo le case produttrici a corredare i propri software di *tool* aggiuntivi. Le piattaforme BIM sono state così dotate di modellatori NURBS, di moduli di calcolo più complessi¹⁴⁷, di nuovi protocolli di trasferimento e scambio e di funzioni di importazione e *processing* delle nuvole.

Un'altra problematica di cui tenere conto nella definizione di una linea procedurale universale per l'HBIM è la complessità dei manufatti da rappresentare e la quasi totale inadeguatezza degli elementi convenzionali usati nel BIM; come è noto, il patrimonio architettonico è in genere fortemente stratificato, morfologicamente articolato, in condizioni statiche talvolta difficili da decifrare e può avere un grado di conservazione altamente variabile; tutti questi aspetti rendono inutili gran parte degli oggetti che costituiscono le famiglie parametriche e richiedono la definizione di nuovi oggetti BEM con un alto grado di dettaglio. In tal senso la modellazione di un manufatto storico può divenire assai complessa e richiedere all'utente la costruzione manuale di nuovi oggetti BEM. Come risposta alle problematiche appena esposte, la pur recente letteratura sull'HBIM propone approcci distinti alla modellazione. Prima di affrontare tale questione è utile precisare che la caratterizzazione di un modello BIM comporta tre aspetti fondamentali¹⁴⁸: la rappresentazione della forma degli oggetti, dei loro attributi e delle relazioni che tra questi intercorrono.

Si è già detto che la rappresentazione della forma è espressa secondo parametri precostituiti e regole geometriche specifiche per ogni oggetto. Gli attributi degli oggetti consentono di arricchire il modello di informazioni puntuali non direttamente connesse alla forma; tali attributi possono essere specificati implicitamente in relazione alla famiglia di appartenenza dell'oggetto, o definiti manualmente dall'utente; spesso contengono informazioni relative ai materiali ma anche report di indagini storiche, interventi conservativi e note tipologiche. Infine, in un modello BIM è necessario che siano rappresentate le relazioni tra le parti, che, come detto, devono essere omogenee e non ridondanti e riguardano prevalentemente la posizione degli oggetti all'interno dell'ambiente virtuale; tali relazioni spaziali sono configurabili attraverso tre modi distinti: aggregazione di oggetti (organizzazione gerarchica dal particolare al generale e viceversa), relazioni topologiche (unito a, dentro, fuori, etc.) e relazioni direzionali (sopra, sotto, etc.).

L'introduzione di tali *features* contribuisce alla definizione semantica del modello digitale.

¹ PLATONE, *Politico* [283b – 285c].

² *Ivi*, [283d 7-9].

³ AGNELLO 1995, pp. 41-73.

⁴ KOYRÉ 1961, p. 90.

⁵ Sul tema si veda cfr. ALBIERO 1999.

⁶ Cfr. paragrafo 1.3.

⁷ SCHELLING 1986, p. 73.

⁸ È nota in letteratura la differenza tra rilevamento e rilievo, essendo il primo l'insieme di procedure e tecniche che consentono l'acquisizione generica del dato metrico, e il secondo l'insieme delle attività critiche di interpretazione, semplificazione e comprensione del manufatto.

⁹ QUATREMÈRE DE QUINCY, 1832, v. misura.

¹⁰ DOCCI, MAESTRI, 1994, p. 30.

¹¹ GREGOTTI 1985.

¹² MIGLIARI 2004, p. 64.

¹³ DE LUCA, VÉRON, FLORENZANO, 2005.

¹⁴ DE LUCA, VÉRON, FLORENZANO, 2005, op. cit. p. 1.

¹⁵ MIGLIARI 2004, p. 63.

¹⁶ «Tra le molte virtù di Chuang-Tzu c'era l'abilità nel disegno. Il re gli chiese il disegno di un granchio. Chuang-Tzu disse che aveva bisogno di cinque anni di tempo e di una villa con dodici servitori. Dopo cinque anni il disegno non era ancora cominciato. «Ho bisogno di altri cinque anni» disse Chuang-Tzu. Il re glieli accordò. Allo scadere dei dieci anni, Chuang-Tzu prese il pennello e in un istante, con un solo gesto, disegnò un granchio, il più perfetto granchio che si fosse mai visto». CALVINO 1993, riproposto in MIGLIARI 2004, op. cit., p. 8.

¹⁷ Nella prefazione al volume, si specifica che «le prime pagine, che corrispondono al momento più intenso della nostra analisi, sono anonime, perché sarebbe veramente difficile, e anche ingiusto, riconoscere loro una paternità». Rispettando la paternità intellettuale dei contributi presenti nel volume *Disegno come modello* e citati in questo testo, chi scrive riferisce il volume a Riccardo Migliari al solo fine di una più chiara notazione bibliografica. Cfr. MIGLIARI 2004, op. cit., Prefazione.

¹⁸ *Ivi*, p. 8.

¹⁹ *Enciclopedia Einaudi*, 1982, voll. 16, IX, v. modello, pp. 383-422, 662-676.

²⁰ AGNELLO 1995, op. cit., p. 24.

²¹ Si condivide la distinzione operata da Riccardo Migliari tra *Modello* inteso come idea progettuale, e *modello* inteso come sua rappresentazione, e si intende impiegarla nel seguito di questo scritto. Sull'idea di Modello, Migliari scrive «Il Modello non è altro che l'idea che il progettista vuole realizzare, oppure è la forma che il rilevatore ha compreso o crede di comprendere studiando un monumento antico». Cfr. MIGLIARI 2004, op. cit., pp. 9-10, e p. 16.

²² DOCCI, MIGLIARI, 1997, p. 30.

²³ *Ivi*, pp. 30-32.

²⁴ PANOFSKY 1927 [ed. 2007], p. 73.

²⁵ GAIANI 2004, p. 47.

²⁶ NOBILE 2009, p. 15. Fino al XVII secolo tale possibilità appare ancora concreta; solo in seguito sono richieste formazioni e conoscenze ben più ampie che inducono le nuove generazioni ad intraprendere studi specialistici.

²⁷ PATETTA 1975, pp. 43-55.

²⁸ Per un approfondimento sulle vicende costruttive della facciata si veda LA BARBERA 1987, pp. 99-108.

²⁹ SUTERA 2009, pp. 161-162.

³⁰ Sull'intera questione si veda *Ivi*, p. 161-166 e nel dettaglio p. 163.

³¹ Un elenco dei terremoti in Sicilia in età moderna è in LIGRESTI 1992, pp. 96-100. Per una puntuale bibliografia sugli eventi sismici dell'isola si veda SUTERA 2012, pp. 171-179.

³² GAIANI 2004, op. cit., p. 46.

³³ FEYERABEND 1975.

³⁴ UGO 1992, op. cit.

³⁵ REMONDINO, EL-HAKIM, 2006.

³⁶ SANSONI, TREBESCHI, DOCCHIO, 2009, p. 577.

³⁷ REMONDINO 2011.

³⁸ «La geomatica è (...) un insieme di discipline e tecniche che mira a fornire un vitale supporto nella gestione del territorio per un'adeguata misura delle condizioni territoriali statiche e per l'identificazione e l'analisi delle possibili evoluzioni dinamiche, in modo da conoscere e prevedere situazioni di pericolosità e di rischio al servizio di possibili attività di allerta in condizioni operative prossime a quelle del tempo

reale. (...) Questo termine è nato nell'università di Laval in Canada nei primi anni Ottanta dello scorso secolo, a seguito della precisa cognizione che le crescenti potenzialità offerte dal calcolo elettronico stavano rivoluzionando le scienze del rilevamento e della rappresentazione e che l'uso del disegno computerizzato, vale a dire della video-grafica, era compatibile con il trattamento di quantità, fino a quel momento impensabili, di dati.

La rivoluzionaria e geniale intuizione di quel periodo fu imperniata sulla georeferenziazione, vale a dire sull'attribuzione delle corrette coordinate geografiche a tutto ciò che è posizionato sul nostro pianeta. La geomatica è definita, quindi, come un approccio sistemico, integrato e multidisciplinare per selezionare gli strumenti e le tecniche appropriate per acquisire in modo metrico e tematico, integrare, trattare, analizzare, archiviare e distribuire dati spaziali georiferiti con continuità in formato digitale». Maurizio Fea e Mario Angelo Gomasca per l'Enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2008).

³⁹ *Ivi*, p. 1105.

⁴⁰ Fotografie acquisite con ottiche non calibrate, fotocamere compatte, tablet e smartphones.

⁴¹ PATIAS 2007; REMONDINO 2011, op. cit.

⁴² VOSSELMAN, MAAS, 2010; REMONDINO et al. 2011.

⁴³ BORNAZ 2004, p. 1 e succ.

⁴⁴ BLAIS 2004, pp. 232-233; SANSONI, TREBESCHI, DOCCHIO, 2009, op. cit., p. 569.

⁴⁵ JUHA HYYPPÄ 2011, pp. 203-204.

⁴⁶ STAIGER 2011, p. 2.

⁴⁷ PFEIFER, BRIESE, 2007.

⁴⁸ Tra i contributi che trattano la classificazione di strumenti laser scanning cfr. JARVIS 1983; BLAIS 2004, op. cit.; GIRELLI 2007; SANSONI, TREBESCHI, DOCCHIO, 2009, op. cit.; JUHA HYYPPÄ 2011, op. cit.

⁴⁹ L'intersezione in avanti si applica quando si conosce la posizione planimetrica di due punti e si vuole determinare la posizione di un terzo punto, misurando gli angoli orizzontali formati dalla congiungente

i punti noti con le direzioni che vanno al punto incognito.

⁵⁰ *Charged Coupled Device*. Cfr. BLAIS 2004, op. cit.; GIRELLI 2007, op. cit. pp. 15-17;

⁵¹ *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Cfr. *Ivi*, *Ivi*.

⁵² BLAIS 2004 op. cit., pp. 232-234; GIRELLI 2007, op. cit. pp. 49-55.

⁵³ Da cui la locuzione Pattern Projection Technique.

⁵⁴ SANSONI, TREBESCHI, DOCCHIO, 2009, op. cit., pp. 572-573.

⁵⁵ Questa tipologia di scanner è particolarmente idonea per la registrazione di solidi di rotazione come vasellame al tornio.

⁵⁶ BORNAZ 2004, op. cit. p. 17.

⁵⁷ *Ivi*, pp. 10-13.

⁵⁸ STAIGER 2011, op. cit., pp. 3-4.

⁵⁹ BERALDIN et al. 2002; GUIDI et al. 2003.

⁶⁰ BESL, MCKAY, 1992.

⁶¹ Stabilisce una relazione tra punti della nuvola sorgente e punti della nuvola obiettivo in un intorno definito in precedenza.

⁶² Stabilisce una relazione tra i punti della nuvola obiettivo e porzioni piane della nuvola sorgente, rappresentate attraverso le normali. Cfr. CHEN, MEDIONI, 1992; GIRELLI 2007, op. cit., pp. 67-71

⁶³ Il metodo dei minimi quadrati è una tecnica di ottimizzazione che consente di trovare una funzione (rappresentata da una curva *ottima*) che si avvicini il più possibile ad un insieme di dati (generalmente i punti del piano). La funzione individuata deve essere tale da rendere minima la somma dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e quelli della curva che rappresenta la funzione stessa. Cfr. AKCA, GRUN, 2004.

⁶⁴ REMONDINO, EL-HAKIM, 2006, op. cit.

⁶⁵ la ricostruzione automatica di tali scene è tuttavia connotata da un elevato grado di arbitrarietà sotto il profilo dimensionale, aspetto che relega di fatto tale procedura ad applicazioni prive di validità scientifica. Cfr. VAN DEN HEUVEL 1998; EL-HAKIM 2001; AL KHALIL, GRUSSENMEYER, 2002; ZHANG et al. 2002; REMONDINO, RODITAKIS, 2003.

⁶⁶ Secondo una definizione di Livio De Luca, la *computer vision* «ha come obiettivo quello di far "capire"

le immagini ai computer: permette di dedurre, a partire dalle immagini, la struttura geometrica in tre dimensioni della scena fotografata o filmata in due dimensioni, basandosi sulle relazioni tra gli oggetti della scena e le loro proiezioni sulle immagini sfruttando lo spostamento della camera (nel senso generico del termine) attorno agli oggetti». DE LUCA 2011, p. 23.

⁶⁷ Istituto di Tutela del Patrimonio Culturale della Contea Federale di Brandeburgo.

⁶⁸ Le fotografie, impresse su lastre di vetro quadrate (40x40 cm), riguardavano prevalentemente monumenti prussiani e tedeschi; numerose acquisizioni erano state condotte anche in Grecia, Libano e Turchia; cfr. ALBERTZ 2001.

⁶⁹ Per un'approfondita trattazione sulle attività di Meydenbauer cfr. ALBERTZ 2001, op. cit., pp. 19-25; GRIMM 1980.

⁷⁰ Sull'origine del termine Photogrammetrie cfr. GRIMM 1980, op. cit.; il contributo dal titolo *Die Photogrammetrie*, è pubblicato nel «Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin». *Ivi*, pp. 54-55.

⁷¹ N.N. 1868, *Über die Verwendbarkeit der Photographie für Terrain- und Architektur- Aufnahmen* (Hierzu Tafel II), in «Archiv für die Offiziere der Königlich Preussischen Artillerie- und Ingenieur- Korps», 32 (1868) Bd.63:189-210. Cfr. GRIMM 1980, op. cit., pp. 57, 60 ref.[14].

⁷² Furono introdotte le lenti con distanza focale di 35 e 53 cm.

⁷³ Regio Istituto Prussiano di Fotogrammetria.

⁷⁴ Sui metodi di restituzione prospettica si dirà in seguito.

⁷⁵ DE LUCA 2011, op. cit., p. 23.

⁷⁶ PARIS 2000, pp. 95-96.

⁷⁷ DE LUCA 2011, op. cit., p. 21.

⁷⁸ *Ivi*, p. 22.

⁷⁹ *Ivi*, p. 23.

⁸⁰ REMONDINO 2011, op. cit., p. 1111.

⁸¹ Da cui la necessità di conoscere la calibrazione della camera.

⁸² affinché tale procedura avvenga correttamente è necessario che le aree documentate siano raffigurate in più immagini mantenendo una sufficiente sovrapposizione.

⁸³ REMONDINO, EL-HAKIM, 2006, op. cit.; WANG et al. 2010.

⁸⁴ DE LUCA 2011, op. cit., prefazione a cura di GAIANI, pagine non numerate.

⁸⁵ REMONDINO, EL-HAKIM, 2006, op. cit., pp. 272-275.

⁸⁶ Per un quadro esaustivo sull'argomento cfr. STREILEIN, 1994; DEBEVEC et al., 1996; EL-HAKIM, 2002; GUARNIERI et al., 2004.

⁸⁷ DE LUCA 2011, op. cit., p. 20.

⁸⁸ DEBEVEC et al., 1996, op. cit.

⁸⁹ EL-HAKIM, 2002, op. cit. Sul funzionamento del *bundle adjustment* si dirà nel seguito di questa trattazione.

⁹⁰ ZHANG et al., 1995.

⁹¹ Tra i più recenti contributi cfr. FASSI 2007.

⁹² Determinate da condizioni ambientali costanti e da medesimi valori di esposizione delle camere.

⁹³ LOWE 2004.

⁹⁴ LONGUET-HIGGINS 1981.

⁹⁵ Che supportano l'uso di più immagini.

⁹⁶ Assimilabili, come detto, ai fasci luminosi catturati dal sensore ottico.

⁹⁷ WESTOBY et al. 2012.

⁹⁸ BARAZZETTI et al. 2010; PIERROT-DESEILLIGNY, CLERY, 2011.

⁹⁹ REMONDINO et al. 2008; VU et al. 2009; FURUKAWA, PONCE, 2010; PIERROT-DESEILLIGNY et al. 2011.

¹⁰⁰ A titolo esemplificativo, i modelli particolarmente dettagliati sotto il profilo geometrico sono difficilmente gestibili dai software per l'indagine strutturale, che richiedono maggiore semplificazione.

¹⁰¹ Strategia che si è ormai ampiamente diffusa in ambito internazionale, e trattata già nel convegno UID 2013; cfr. CONTE, FILIPPA, 2013.

¹⁰² Per l'argomento si rimanda ai capitoli successivi.

¹⁰³ Sitografia ref. [1]

¹⁰⁴ Sitografia ref. [2]

¹⁰⁵ Web-based Graphic Library.

¹⁰⁶ Gli algoritmi, sviluppati a partire dal 2006 con il progetto Scanopy (SCAN data Organisation, Processing and display), consentono di ottimizzare i dati grezzi acquisiti dallo scanner attraverso l'eliminazione del rumore di acquisizione o il completamento di aree non acquisite; cfr. WIMMER, SCHEIBLAUER, 2006.

¹⁰⁷ Sitografia ref. [3]

¹⁰⁸ Il codice di programmazione impiegato fa ampio uso di templates facilmente integrabili su pagine HTML; ciò nel tentativo di rendere 3DHOP accessibile anche a utenti non esperti.

¹⁰⁹ I risultati delle seguenti ricerche sono frutto di un intenso lavoro svolto con docenti e studiosi del laboratorio di Computer Grafica del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Palermo, con docenti e ricercatori in Rappresentazione e in Storia dell'Architettura afferenti alla sezione SfeRa, con la professoressa Ana Castro Santamaria, titolare di una cattedra in Historia del Arte, afferente al Departamento de Historia del Arte presso l'Universidad de Salamanca; a tutti loro va il mio grande riconoscimento per questi anni di proficua collaborazione.

¹¹⁰ DE LUCA, VÉRON, FLORENZANO, 2005, op. cit. pp. 1-2.

¹¹¹ VOSSelman et al. 2004; RABBANI et al. 2006.

¹¹² SKARBK, KOSCHAN, 1994; JIANG, BUNKE, 1994; PANTOFARU, HEBERT, 2005; ZHAN, LIANG, XIAO, 2009;

¹¹³ ZHAN, LIANG, XIAO, 2009, op. cit., p. 248.

¹¹⁴ VOSSelman et al. 2004, op. cit., p. 33.

¹¹⁵ HICHRI et al. 2013, p. 344.

¹¹⁶ ZHAN, LIANG, XIAO, 2009, op. cit.

¹¹⁷ NING et al. 2010.

¹¹⁸ POTTSMANN, WALLNER, 1999; DORNINGER, NOTHEGGER, 2007.

¹¹⁹ Tale algoritmo deriva dalla Trasformata di Hough (Hough Transform, HT), procedura che permette di individuare le curve che costituiscono una figura a partire dalla loro proiezione puntiforme in uno spazio dei parametri che viene definito come Spazio di Hough; cfr. DUDA, HART, 1972.

¹²⁰ BALLARD 1981.

¹²¹ Sull'argomento si vedano anche ILLINGWORTH, KITTLER, 1988; BEINGLASS, WOLFSON, 1991; VOSSelman et al. 2004 op. cit.; RABBANI, VAN DEN HEUVEL, 2005; DE ROSSI 2012;

¹²² SHUM, KANG, 2000.

¹²³ La ricerca è stata svolta nell'ambito del progetto COSMED, «Dalla stereotomia ai criteri antisismici: crocevia di

sperimentazioni progettuali. Sicilia e Mediterraneo (XII-XVIII secolo)», beneficiando di un finanziamento da parte del Consiglio Europeo della Ricerca nell'ambito del Settimo programma quadro dell'Unione europea (FP7/2007-2013) / ERC grant agreement n° 295960 – COSMED.

¹²⁴ Ciò è evidente tracciando la porzione di circonferenza che descrive l'involucro esterno del catino, ma anche tutte le circonferenze ad essa concentriche e passanti per tutti gli elementi architettonici disposti a raggiera. In un ipotetico impianto planimetrico decagonale, le diagonali del decagono, rappresentate attraverso le proiezioni orizzontali di costoloni opposti, sarebbero allineate e contenute in un'unica retta passante per il centro geometrico della composizione (la chiave pendula). Nell'abside di Cursi non c'è corrispondenza tra il centro del decagono da cui si diramano le diagonali e il centro della suddetta circonferenza, che si attese sulla proiezione della chiave. Ciò ha condotto alle conclusioni che seguono.

¹²⁵ ABBATE, CANNELLA 2015, pp. 21-39.

¹²⁶ Tale insolita soluzione è maggiormente diffusa in territorio iberico e definita come «*bóveda gallonada*».

¹²⁷ ABBATE, CANNELLA 2015, op. cit., pp. 25-34 e in dettaglio p. 32.

¹²⁸ LIMING 1944.

¹²⁹ Una nota autobiografica di de Casteljaú è rintracciabile in DE CASTELJAU [1999].

¹³⁰ DE CASTELJAU 1963; DE CASTELJAU 1985.

¹³¹ La prima divulgazione è rintracciabile in KRAUTTER, PARIZOT, 1971.

¹³² FARIN, HOSCHEK, KIM, 2002, p. 5.

¹³³ Tali funzioni sono note come polinomi di Bernstein.

¹³⁴ SALA, SALA, 2005, p. 95.

¹³⁵ Computer Aided Design/Manufacturing.

¹³⁶ Il CATIA è sviluppato dalla Dassault Systèmes per la costruzione di aerei militari e in seguito commercializzato dall'IBM.

¹³⁷ Ian Braid della Cambridge University (UK), Bruce Baumgart della Stanford University (USA), e Ari Requicha e Herb Voelcker dell'University of Rochester (USA); cfr. EASTMAN et al. 2008, pp. 26-27.

¹³⁸ Per un approfondimento sulle origini del CAD si veda Sitografia ref. [4]

¹³⁹ I solidi comunemente noti come primitive sono solidi semplici, dalla cui composizione è possibile ottenere configurazioni complesse; in genere è possibile scomporre in primitive la maggior parte delle forme complesse usate in architettura; le primitive più comuni sono il parallelepipedo, il cilindro, la sfera, il cono e il toro.

¹⁴⁰ OSELLO 2012, p. 27.

¹⁴¹ GORDON, RIESENFELD, 1974.

¹⁴² Per tale ragione le curve di Bézier costituiscono una formulazione specifica delle più generiche B-spline. FARIN, HOSCHEK, KIM, 2002, op. cit., p. 10.

¹⁴³ Sono curve non razionali le NURBS *free-form*, mentre sono curve razionali le coniche.

¹⁴⁴ Uno tra i principali modellatori NURBS oggi in commercio è McNeel Rhinoceros®.

¹⁴⁵ OSELLO 2012, op. cit., p. 27.

¹⁴⁶ EASTMAN et al. 2008, pp. 57-62.

¹⁴⁷ I moduli di calcolo nelle piattaforme BIM sono prevalentemente orientati alla gestione di strutture a telaio in c.a. o acciaio; al presente, sebbene l'attenzione verso gli aspetti statici di strutture miste sia notevolmente aumentata nel settore, non è noto a chi scrive un tale modulo di calcolo integrato nelle piattaforme BIM.

¹⁴⁸ HICHRI et al. 2013, op. cit., p. 344.

PARTE SECONDA
I CASI STUDIO

capitolo 4 _ Le cupole su torrini attraverso le fonti documentarie

«Si slanciavano nell'azzurro cielo i minareti bianchi e le torri dei campanili sfolgoreggiavano al sole trecento cupole dorate. Sotto gli alti palmizi, fiorivano i giardini, tra i quali scorrevano fonti armoniose. La ricchezza, la magnificenza delle case, delle botteghe, degli atrii, della gente che vi formicolava, si completava con la bellezza e la magnificenza della natura: cielo, terra, mare, parevano che su questo angolo di mondo non potessero che sorridere.»

(LUIGI NATOLI, *Storie e leggende di Sicilia*)

4.1 Individuazione dei casi studio

Il modello di cupola oggetto di questa ricerca si contraddistingue per alcuni caratteri costruttivi e formali ben definiti; tale congegno architettonico è caratterizzato da un tamburo ottagonoo circolare, che si imposta su una crociera quadrata estradossata ed è rinserrato sulle diagonali da quattro contrafforti cilindrici posti in asse con i pilastri sottostanti. Conclude il congegno una copertura, solitamente a doppia calotta, che negli esempi più recenti è dotata di lanterna.

Durante le fasi preliminari dell'indagine è stata condotta una ricerca tipologica su alcuni esemplari nel bacino del Mediterraneo e nella penisola iberica; in Castiglia sono stati individuati tre casi studio risalenti al XII-XIII secolo e appartenenti al cosiddetto *Grupo de cimborrios del Duero* [fig. 36], ossia:

- la cupola nella *Catedral de la Transfiguración del Salvador* a Zamora;
- la *Torre del Gallo* nella *Catedral Vieja* o *de Santa María De La Sede* a Salamanca;
- la cupola nella *Colegiata de Santa María la Mayor* a Toro;



Figura 36; (a) cupola della cattedrale di Zamora; (b) Torre del Gallo nella Catedral Vieja de Salamanca; (c) cupola della Colegiata di Toro.

in Sicilia sono state selezionate tre cupole realizzate tra XVII e XVIII secolo [fig. 37]:

- la cupola nella chiesa del Gesù nella Casa Professa di Palermo;
- la cupola nella chiesa di Sant'Angelo Martire a Licata (AG);
- la cupola nella cattedrale di San Lorenzo a Trapani.



Figura 37; (a) cupola del Gesù di Palermo; (b) cupola della chiesa di Sant'Angelo a Licata (AG); (c) cupola della cattedrale di Trapani.

La cupola della chiesa del Gesù di Palermo è documentabile dalle sole fonti d'archivio poiché, a seguito dei bombardamenti del 1943, è stata sostituita da una nuova cupola in cemento armato, costruita sotto la direzione dell'architetto Francesco Valenti.

Di seguito si ripercorrono sinteticamente le vicende costruttive delle fabbriche, tentando di tracciare un quadro evolutivo del modello di cupola a torrini angolari ed evidenziando i caratteri comuni che hanno guidato i processi progettuali e costruttivi.

4.2 La diffusione del modello: questioni aperte

In Castiglia, l'origine del modello di cupola contraffortata sulle diagonali della crociera risalirebbe alla fine del XII secolo: tutto sembra iniziare quando l'elegante cupola della cattedrale *de la Transfiguración del Salvador* a Zamora, probabilmente prossima alla conclusione, manifesta le prime preoccupanti lesioni; nel tentativo di scongiurare il crollo, al *cimborrio*¹⁴⁹ vengono addossati quattro contrafforti cilindrici posti in asse con i sottostanti pilastri della crociera. Tale espediente, che il maestro della fabbrica ritiene evidentemente efficace sotto il profilo strutturale, è probabilmente frutto di una prassi costruttiva dedotta dall'osservazione di manufatti simili.

La letteratura storiografica del primo Novecento¹⁵⁰ ipotizza, per tale congegno, una linea genealogica legata a esperienze francesi o bizantine, rintracciando in quegli ambienti affinità formali e linguistiche dovute prevalentemente all'impiego di modelli d'importazione dalla vicina Francia e da maestranze provenienti dal Medioriente.

Nel 1922, Leopoldo Torres Balbás così scrive del «problema de la arqueología monumental española»:

El arte románico español procede casi totalmente de Francia; es un arte importado. Mézclense de tal modo en nuestro país escuelas e influencias, que resulta muy difícil clasificar los monumentos de los siglos XI y XII, tanto de arquitectura como de escultura, según los tipos regionales aceptados por los arqueólogos franceses.

Dado el origen de 'nuestro románico, lo lógico es buscar en la nación vecina los prototipos de estas obras admirables de Zamora, Salamanca y Toro.¹⁵¹

Influenze arabe e mozarabiche¹⁵² potrebbero riscontrarsi nelle configurazioni *gallonade*¹⁵³ delle calotte, mentre in aree geograficamente più prossime il modello appare nei campanili di chiese siciliane¹⁵⁴ e campane¹⁵⁵, come quelli di Santa Maria dell'Ammiraglio a Palermo e del Sant'Andrea ad Amalfi [fig. 38];

anche in questo caso la diffusione del modello sembrerebbe legata alla circolazione di maestranze formatesi alla corte dei re normanni.



Figura 38; (a sinistra) Palermo, chiesa di Santa Maria dell'Ammiraglio, campanile; (a destra) Amalfi, duomo di Sant'Andrea, terminazione del campanile.

Il *cimborrio* zamorano è riproposto alcuni decenni più tardi in almeno tre fabbriche coeve, a Salamanca, Toro e Plasencia. A Salamanca l'originario progetto per la copertura della crociera viene abbandonato in favore di una soluzione a cupola con torrini, e a distanza di secoli, anche il progetto di Joaquín de Churriguera (1742?) per la cupola della *Catedral Nueva* di Salamanca [fig. 39], appare chiaramente ispirato, nella configurazione contraffortata, al *cimborrio* dell'adiacente fabbrica medievale.

Sebbene lontane nel tempo e negli apparati linguistici, alcune cupole siciliane riprendono il modello sperimentato in Castiglia. In Sicilia la diffusione del modello è circoscritta ad appena un secolo, dalla metà del XVII agli anni Trenta del XVIII. La natura apparentemente episodica di tali realizzazioni nasconde un complesso intreccio di vicende e protagonisti e un rimando a specifiche conoscenze teoriche e a consolidate pratiche costruttive. Il riferimento per gli esempi siciliani è costituito dai campanili della capitale dell'isola, e più precisamente dalle trecentesche torri angolari della cattedrale di Palermo e dalla torre campanaria di Santa Maria dell'Ammiraglio (1146-1185)¹⁵⁶. Altre influenze sembrerebbero provenire dalla Penisola. Recenti studi ipotizzano un coinvolgimento diretto dell'architetto Francesco Buonamici da Lucca¹⁵⁷ nel progetto per la cupola della chiesa del Gesù di Palermo, prima cupola a torrini di Sicilia in età moderna. Buonamici, che vanta specifiche competenze ingegneristico-militari e gode del favore dell'ordine ignaziano, può senz'altro aver introdotto soluzioni a lui ben note, osservate in «celebri fabbriche lombarde, come la certosa di Pavia e la tribuna di Santa Maria delle Grazie a Milano»¹⁵⁸. La sua formazione ingegneristica suggerisce una diversa chiave di lettura per la soluzione dei torrini:

Il peso della cupola è scaricato attraverso gli archi maggiori sui pilastri dove pertanto agiscono forze spingenti dovute alla componente orizzontale del vettore delle forze. Evidentemente, nelle intenzioni del progettista, questa azione destabilizzante l'equilibrio dei piedritti sarebbe stata più efficacemente contrastata dalla maggiore compressione esercitata sugli stessi dal peso dei quattro corpi semicilindrici. Il precedente insuperato della originale soluzione strutturale è la brunelleschiana cupola di Santa Maria del Fiore il cui ottagono di base è rinforzato dalle masse statiche delle tribune morte, soluzione ben presente al toscano Buonamici.¹⁵⁹

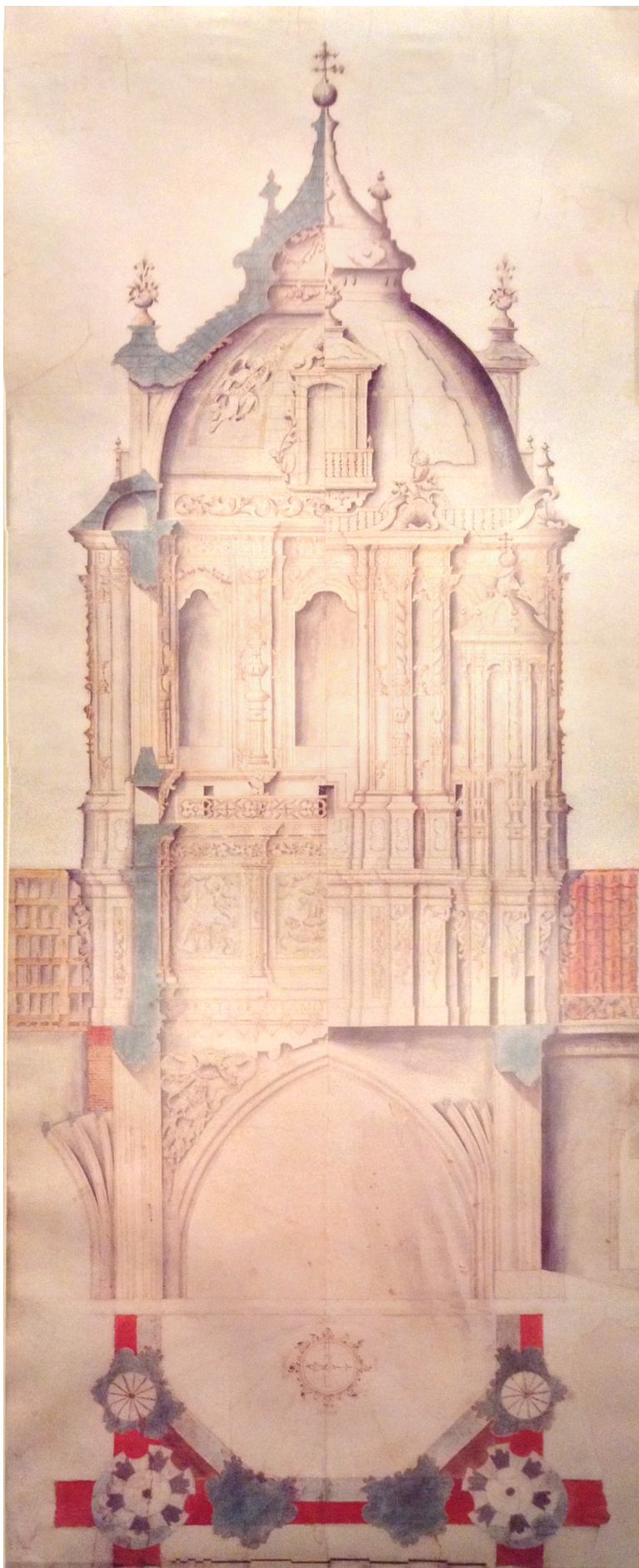


Figura 39; Joaquín de Churriguera, progetto per la cupola della Catedral Nueva di Salamanca, 1742 (?), pianta e alzato in doppia proiezione.

Negli anni successivi alla sua realizzazione, la nuova cupola del Gesù deve certamente aver suscitato un dibattito nella Compagnia e più in generale tra i tecnici e gli intellettuali coinvolti a vario titolo nelle vicende del cantiere. Da questa prima esperienza scaturisce una sperimentazione che sembra coinvolgere tutta l'isola e l'eco del nuovo modello di cupola raggiunge anche le aree più marginali della Provincia. Le ricadute del modello con contrafforti angolari a Palermo sono evidenti almeno in un altro eccellente caso, ossia la cupola della chiesa del Carmine (1679) dell'architetto Angelo Italia¹⁶⁰, che presenta possenti telamoni in sostituzione dei torrini [fig. 40].

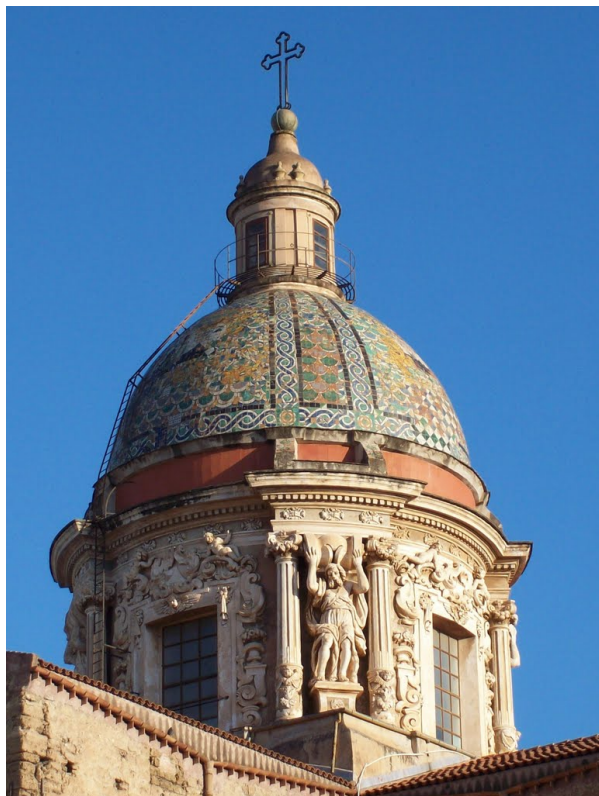
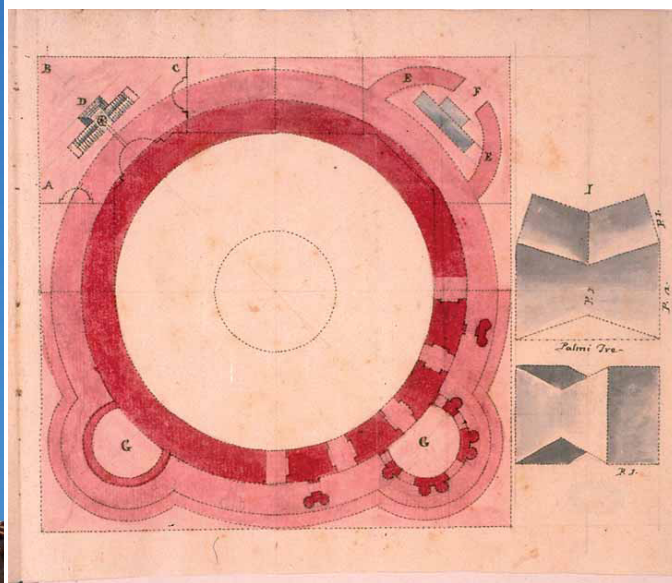


Figura 40; (a sinistra)Palermo, chiesa del Carmine, cupola.

Figura 41; (sotto) Progetto elaborato da Giovanni Biagio Amico per il consolidamento della cupola di San Pietro a Roma; edito in SCHLIMME 2006, op. cit., p. 59.



Anche per i casi siciliani, ragioni statiche sembrano influenzare le scelte progettuali; negli anni Quaranta del XVIII secolo, in un acceso clima di fermento, l'architetto trapanese Giovanni Biagio Amico, all'apice della sua carriera professionale, fa pervenire a Roma una proposta di consolidamento per la cupola di San Pietro [fig. 41]; nel manoscritto, datato 16 febbraio 1743, l'architetto propone l'aggiunta di

quattro Lanternini con farli vestire delli stessi ornamenti della Cupola, come espressa il modello, quali non solamente rincontreranno la Cupola à non far, che più s'aprissero i Peli già fatti (posto che come asseriscono codesti Sig[no]ri Virtuosi la colpa è originata dalla struttura della Cupola sudetta) ma pur anco una tal carica, che agiugne la costruttura dei sud[det]ti Lanternini gioverà à far restare più sodi li detti Pilastroni nei casi fortuiti dei Terremoti impedendo pure qualche impulso, che potrebbero dare gl'archi maggiori, sopra i quali v'è à maraviglia la gran mole della Cupola sostenuta.¹⁶¹

L'osservazione delle fabbriche che avevano resistito ai terremoti, come le cupole del Gesù di Palermo e del Sant'Angelo a Licata – ideata dal gesuita Angelo Italia per la ricostruzione della chiesa dopo il terremoto del 1693 – devono aver indotto Amico a ritenere il modello talmente affidabile da proporne l'applicazione per il San Pietro; peraltro, lo stesso Amico aveva avuto modo di cimentarsi sul tema, costruendo una cupola a torrini nella cattedrale di San Lorenzo a Trapani (1734-36).

Dalle esperienze sin qui tracciate emergono alcuni fattori che permettono di circoscrivere più accuratamente l'ambito di studio; in primo luogo appare senz'altro determinante il ruolo che l'ordine gesuita ha avuto nella

diffusione del modello, favorendo la circolazione di disegni e promuovendo il riferimento a esempi illustri per le nuove realizzazioni. È utile rammentare la volontà della Compagnia di stabilire criteri di progettazione codificati e votati alla semplicità (il meglio noto *modo nostro* promosso e veicolato dall'Ordine); dal 1566, questa necessità veniva ribadita prescrivendo l'invio a Roma, per l'approvazione, dei progetti per le sedi distaccate¹⁶², anche se non sono rari i casi in cui questa direttiva veniva disattesa o elusa, dando origine a una serie di codici autoctoni, scaturiti dalla sovrapposizione tra il «linguaggio standard della Compagnia (...) e i criteri diffusi in ambito locale»¹⁶³. Prova di questa evoluzione tipologica si rintraccia facilmente dal confronto delle piante delle fabbriche gesuite: dal pauperistico modello ad aula, fortemente perorato dagli architetti della prima generazione, si assiste ad una graduale adozione della soluzione a tre navate, introdotta dall'architetto Giuseppe Valeriano¹⁶⁴ a Marsala (1592) e in seguito consolidatasi con l'attività di Natale Masuccio¹⁶⁵; altresì eloquente è il passaggio dal pilastro alla serliana, promosso a Trapani da Tommaso Blandino¹⁶⁶ presumibilmente sulla scia di modelli liguri del Cinquecento e Seicento¹⁶⁷. Non è da escludere che questo particolare processo di evoluzione tipologica e formale abbia rappresentato un momento di fecondità per la formulazione di nuove soluzioni per le cupole delle chiese.

Il contributo dell'Ordine non si limita alla sola diffusione di modelli e disegni, ma si estende anche alla formazione dei professionisti, almeno dal XVII secolo in poi. Sebbene, infatti, la prima generazione di architetti gesuiti (XVI secolo) si sia formata fuori dalla Compagnia¹⁶⁸, non è un caso che, dalla seconda metà del Seicento (e salvo alcuni rari casi), gli architetti più affermati nel panorama siciliano abbiano acquisito, con l'ingresso nell'ordine, uno *status* sociale che garantisce la formazione di una cultura specialistica; come ricorda Marco Nobile, tale processo non è certo nuovo, poiché favorito, fin dal Medioevo, dalla costituzione di gruppi di professionisti appartenenti agli ordini monastici e formati nei cantieri ecclesiastici sotto la direzione di confratelli più esperti; secoli dopo, la necessità di rispondere alle questioni poste dalla costruzione di opere complesse, specie in un territorio più volte tormentato da eventi sismici, richiede conoscenze che oltrepassano le abilità di artigiani e maestri (ad esempio in ambito matematico) e conduce alla progressiva «clericalizzazione» della professione, che raggiunge il suo apice nella seconda metà del Seicento¹⁶⁹.

In questo contesto, almeno dall'insediamento dei gesuiti in Sicilia, la guida della frenetica attività edificatoria della Compagnia è affidata prevalentemente ad architetti dell'ordine e, nei casi più complessi o prestigiosi, a singole personalità che assumono il ruolo di architetti della Provincia; a solo titolo esemplificativo si vedano le numerose richieste avanzate dal padre provinciale per il ritorno di Giovanni Tristano a Palermo, per sopperire al *mancomento di Architecti*¹⁷⁰ in grado di affrontare le problematiche emerse nel cantiere del Gesù. La medesima prassi è riconfermata con l'opera degli architetti Giuseppe Valeriano¹⁷¹, Natale Masuccio e Tommaso Blandino, cui è affidata gran parte dei cantieri della Provincia tra gli anni Ottanta del Cinquecento e la terza decade del secolo successivo. In seguito, tale rapporto fiduciario tende a diluirsi e in alcuni casi a scomparire del tutto, coinvolgendo tecnici esterni di rinomata esperienza, chiamati a completare le fabbriche della Compagnia. Oltre al già citato caso di Buonamici, i cui interventi si estendono a Siracusa, Palermo, Trapani e Valletta, si annoverano anche quelli dell'ingegnere napoletano Giovanni Andrea Gallo, intervenuto nel progetto del complesso di San Francesco Saverio a Messina, e del pittore e architetto Michele Blasco, presente a Sciacca per il completamento della chiesa e del collegio della Compagnia¹⁷².

Sulla base di tali presupposti, non è da escludere che il bagaglio di saperi accumulato in quegli anni nell'orbita della Compagnia, abbia potuto contribuire a diffondere nuove tipologie costruttive, come le cupole su torrini; allo stato attuale degli studi, poco è noto circa l'eventuale diffusione di modelli *antisismici*.

Certo è che, anche nella lontana Argentina, a Cordoba, in un'altra area soggetta a terremoti, si usa un espediente simile e sorge il sospetto che esista un prototipo comune, forse persino una teoria scritta o orale, che non conosciamo ancora.¹⁷³

D'altra parte, a una serie di intuizioni antisismiche rimandano alcune sperimentazioni settecentesche (segno di una conoscenza già matura della questione) come, ad esempio, quelle sul tema della facciata-torre in Sicilia¹⁷⁴, quelle sul sistema a telaio ligneo in Calabria¹⁷⁵, o ancora quelle sui conci a doppia coda di rondine per il consolidamento delle strutture murarie¹⁷⁶. Alla luce di tali considerazioni, ci si domanda quali relazioni possano collegare le cupole di Castiglia agli esempi siciliani e se sia possibile definire una teoria comune, perfezionata empiricamente attraverso l'osservazione dei sistemi costruttivi ritenuti più efficaci. Recenti ricerche interdisciplinari hanno posto interessanti questioni sugli espedienti progettuali volti ad arginare i rischi sismici¹⁷⁷; tali studi convengono nell'affermare che l'espedito dei torrini angolari possa far parte di una raccolta di *best practices* la cui formulazione e veicolazione è tuttora poco nota. D'altra parte, è evidente come la frequenza di eventi sismici nel bacino del Mediterraneo abbia spinto a perfezionare le tecniche costruttive sulla base di esperienze pregresse o dell'osservazione di manufatti scampati al crollo.

4.3 Cronologia e vicende costruttive delle cupole di Castiglia e León

4.3.1 La cupola della Catedral de la Transfiguración del Salvador a Zamora

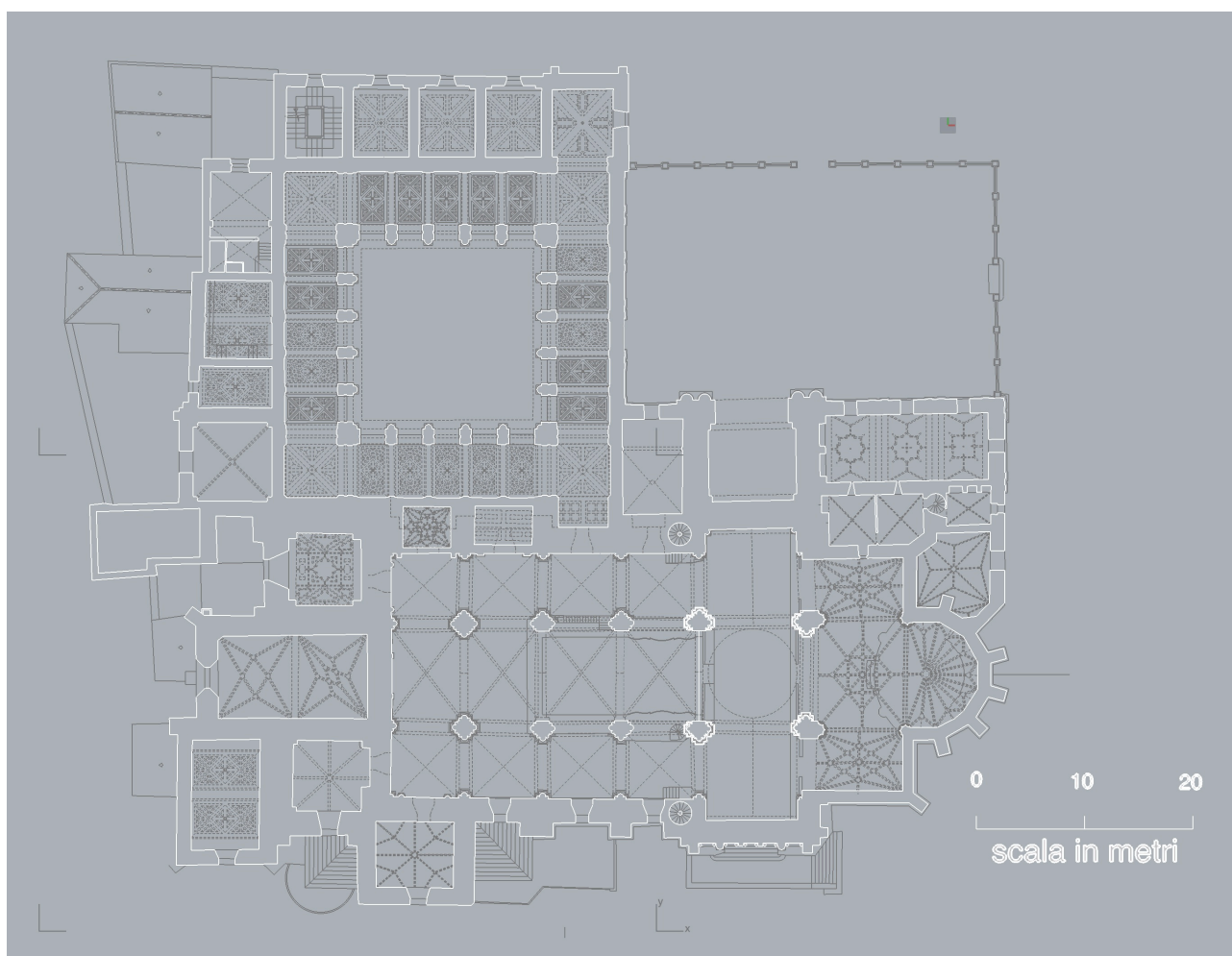


Figura 42; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, pianta (CASASECA BENEITEZ).

La cattedrale di Zamora sorge su un più antico edificio religioso del X secolo, costruito durante il programma di ripopolamento della città promosso dal sovrano Alfonso III delle Austrie (Alfonso Ordoñez *el Magno*), a seguito della *Reconquista* di parte dei territori del Duero (890-900). Fino al 1102 la sede vescovile

di Zamora era rimasta vacante e per questo era stata assorbita dalle vicine diocesi; a partire da questa data due chierici aquitani, Jerónimo Visque de Périgord (1102-1120) e Bernardo de Périgord (1121-1149) si succedettero nella carica di vescovo, ristabilendo nuovamente l'indipendenza della diocesi.

La cattedrale di Zamora è la più piccola tra quelle della regione di Castiglia e León; la pianta dell'edificio è a croce latina, con tre navate e transetto [fig. 42]; tra XIII e XV secolo alcune cappelle private vengono addossate ai fianchi occidentale e meridionale della fabbrica, occultando l'originario ingresso a ovest; la cinquecentesca *cabecera*¹⁷⁸ è formata da un presbiterio a tre campate e da un'abside poligonale contraffortata all'esterno [fig. 51]. L'ingresso alla fabbrica avviene oggi dalla monumentale facciata costruita tra la fine del XVI e gli inizi del XVII secolo sulla terminazione nord del transetto. Nell'angolo nord-occidentale della fabbrica un'imponente torre campanaria a pianta quadrata viene edificata durante il XIII secolo, probabilmente per scopi difensivi.

La cattedrale si distingue per la varietà delle tipologie di copertura adottate, segno di una stratificazione di sensibilità e gusti propri di periodi differenti. Le navate laterali sono coperte con crociere a sesto acuto su sovrassesto, impostate su archi a sesto acuto che delimitano campate quadrate; crociere costolonate a sesto acuto su sovrassesto coprono le quattro campate rettangolari della navata centrale, modificando così il progetto originario che prevedeva semplici crociere prive di costoloni; l'altezza maggiore della navata centrale consente di illuminare l'interno della chiesa con finestre dal profilo ogivale. Le terminazioni del transetto sono coperte con volte a sesto acuto, ordite secondo l'asse nord-sud in continuità con gli archi della crociera. La *cabecera* presenta un complesso sistema di volte costolonate: tre volte a tredici chiavi coprono l'area del presbiterio e una raffinata volta ad ombrello posta nel catino absidale conclude il sistema di coperture [fig. 43]. La cupola di Zamora presenta un sistema a doppia calotta in cui i due strati rimangono indipendenti: all'interno, una cupola dal profilo semicircolare è scandita da sedici costoloni che convergono sulla chiave [fig. 44]; grazie a una particolare disposizione dei conci, le vele tra i costoloni assumono una configurazione a



Figura 43; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, copertura della *cabecera*.

spicchio d'arancia; all'esterno, un'analogha configurazione *gallonada* (a spicchio d'arancia), dotata di squame in pietra, arricchisce il profilo dell'estradosso [fig. 45]. L'area tra le due membrane della calotta è riempita con pietrame informe e malta. La cupola si imposta su un tamburo a pianta circolare, sul quale si aprono sedici piccole finestre a ogiva, delimitate da un sistema di tre semicolonne addossate sia all'interno che all'esterno. Le tre semicolonne interne hanno altezze differenti: le due laterali sostengono altrettanti archetti ogivali che riquadrano le finestre, mentre la semicolonna centrale raggiunge l'imposta della calotta da cui si dipartono i costoloni. Il sistema di semicolonne esterne riproduce un elaborato motivo di archetti a rincassi.



Figura 44; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, interno, cupola.



Figura 45; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, esterno, cupola.

Il tamburo si imposta su quattro pennacchi (*pechinas*) sostenuti dai pilastri polistili della crociera quadrata; ai vertici della crociera, alla quota d'imposta del tamburo si innestano quattro torrini a sezione circolare, trattati con lo stesso motivo a rincassi che contraddistingue l'intero *cimborrio* [fig. 46]. Esternamente, una cornice continua a dentelli e archetti percorre il perimetro della cupola, separando il tamburo dalla calotta e i torrini dagli elaborati coronamenti; questi ultimi riproducono in dimensione ridotta il motivo della cupola, attraverso un sistema di colonnine che sorregge un architrave continuo sul quale si imposta un cupolino decorato a squame. Nel suo insieme, tale elaborata composizione sembra richiamare un sistema a quinconce. Sugli assi della navata e del transetto, sempre all'altezza del tamburo, si collocano in aggetto quattro terminazioni rette con coronamento a timpano.

Al vescovato di Bernardo de Périgord risalgono le prime notizie documentarie sulla cattedrale; con un documento del 1135 il sovrano Alfonso VII dona al vescovo la chiesa di *Santo Tomé*, al fine di trasferirvi la propria sede¹⁷⁹. Non è noto se tale trasferimento sia effettivamente avvenuto¹⁸⁰: la donazione del 1135 potrebbe suggerire l'avvio dei primi lavori per la costruzione di una nuova cattedrale; durante le fasi costruttive la chiesa di *Santo Tomé* avrebbe garantito la celebrazione del culto. Nel 1139, a seguito della presa di Pinilla, il sovrano concede una nuova donazione, questa volta pecuniaria, alla «*ecclesie Sancti Salvatoris que fundatur in Camora dominoque Bernardo eiusdem venerabili episcopo*»¹⁸¹; è possibile che la disponibilità di nuove risorse provenienti dalle campagne militari abbia permesso di finanziare i lavori già durante il vescovato di Bernardo; ulteriori conferme arriverebbero da una donazione datata 14 giugno 1142, che attribuisce nuovamente la fondazione della chiesa a Bernardo, «*eiusque loci episcopo*»¹⁸². Tra il 1148 e il 1160, infine, si registrano alcuni atti di compravendita relativi alle abitazioni collocate nei pressi dell'antica chiesa, che farebbero presupporre la necessità di liberare nuove aree per il cantiere già avviato.

Le notizie documentarie finora riportate sembrerebbero non lasciare dubbi sulla datazione dell'opera e sull'avvio del cantiere



Figura 46; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, esterno, dettaglio dell'innesto dei torrini sul tamburo.

sotto il vescovato di Bernardo, in una data precedente l'anno 1139; tuttavia, in una lastra commemorativa del XVII, attualmente collocata nel braccio nord del transetto, sono riportate tre iscrizioni del XII secolo, dalle quali si desume una diversa cronologia delle vicende costruttive; secondo la prima di tali iscrizioni, la chiesa, edificata in soli ventitré anni, sarebbe stata consacrata dal vescovo Esteban nel 1174; ciò sposterebbe in avanti l'avvio dei lavori, sino all'anno 1151, cioè a poco più di un anno dalla morte di Bernardo; un privilegio pontificio del gennaio dello stesso anno, che attribuisce al nuovo vescovo in carica i beni della cattedrale, legittimerebbe anticipatamente la nuova sede vescovile, in attesa della fine dei lavori¹⁸³. La seconda iscrizione della lastra riporta un'epigrafe del vescovo Guillermo, successore di Esteban; la terza è una memoria che indica il monarca Alfonso VII¹⁸⁴ come fondatore della chiesa.

Secondo Ramos de Castro, è evidente che l'ambiguità cronologica tra le fonti debba risolversi in favore dei documenti archivistici, adducendo due ulteriori motivazioni: in primo luogo l'eventualità che siano stati commessi errori di trascrizione nella riproduzione della lastra del Seicento; in secondo luogo, l'esistenza di un'iscrizione incisa sul basamento della parete sud, che testimonia la presenza, in quell'area, della tomba del vescovo Bernardo; quest'ultimo aspetto confermerebbe che alla morte del vescovo (1149) almeno le absidi e la parte sud del presbiterio dovevano essere completate.

Gli studi archivistici non hanno ancora rintracciato sufficienti conferme documentarie sulla data di posa della prima pietra, lasciando aperti gli interrogativi sulla cronologia della fabbrica. Sebbene nelle tre decadi tra il 1140 e il 1170 si registrino ingenti donazioni in favore del vescovo e della chiesa – che avranno certamente contribuito a dare un forte impulso all'avanzamento dei lavori, tanto da consentire nel 1169 la celebrazione del culto¹⁸⁵ – appare improbabile che, alla data della consacrazione, la cattedrale sia già stata ultimata. Gli studiosi sembrano piuttosto concordare su un complessivo stato di avanzamento che vedrebbe completati il presbiterio e le absidi (che potevano ospitare già dal 1169 alcune celebrazioni) e definiti il perimetro della cattedrale e la disposizione dei pilastri della navata; ancora incompleti, a quella data, rimarrebbero le mura della navata centrale, le facciate del transetto e il sistema di copertura¹⁸⁶. Durante l'ultimo quarto del XII secolo vengono probabilmente edificate le facciate del transetto, le crociere ad arco acuto nelle navate e la cupola. Ramos de Castro ipotizza che nella costruzione delle volte della navata centrale sia potuto intervenire il maestro Fruchel, *maestro de obras* della cattedrale di Ávila, la cui presenza è documentata a Zamora tra il 1172 e il 1204¹⁸⁷. A partire dal secolo successivo si realizzano il chiostro e la torre.

Agli inizi del Duecento, la pianta era caratterizzata da una configurazione a tre absidi, documentata anche da alcuni resti recentemente portati alla luce durante una campagna di indagini archeologiche¹⁸⁸; l'antica *cabecera* viene sostituita, tra la fine del XV secolo e l'inizio del successivo, dall'attuale soluzione sopraelevata. All'esterno, l'abside è ulteriormente irrobustita da contrafforti poligonali disposti a raggiera. Nel 1591 un incendio provoca gravi danni al chiostro, che viene riparato e in parte ricostruito nei decenni successivi. I lavori di ampliamento proseguiranno sino alla metà del Seicento, con l'aggiunta delle due sacrestie e della tribuna nel braccio meridionale del transetto.

A causa della sostanziale assenza di informazioni documentarie, rimane oscura la sequenza delle vicende costruttive della cupola; la stessa datazione dell'avvio dei lavori per la sua costruzione, certamente posteriore al 1174, è tutt'ora incerta; diversi studi ipotizzano una datazione approssimativa della fabbrica attraverso il confronto con l'architettura coeva e l'analisi degli apparati decorativi. Secondo le considerazioni finora esposte, la letteratura assume l'ultimo ventennio del secolo come periodo di gestazione per la costruzione della cupola.

Anche sulla provenienza del maestro della fabbrica rimangono aperti numerosi interrogativi: Élie Lambert¹⁸⁹ ipotizza che il maestro abbia origini francesi, e sia arrivato nel regno al seguito del vescovo Bernardo de Périgord; concordano con tale ipotesi gran parte degli studiosi, tra cui Vicente Lampérez Romea, che individua ascendenze aquitane nell'uso dei pennacchi di sostegno della cupola e nella particolare decorazione a squame della calotta¹⁹⁰. Gomez Moreno, nel *Catalogo Monumental*, pur sostenendo l'ipotesi dell'origine francese del maestro della cattedrale, ravvisa influenze orientali negli apparati decorativi e nelle

scelte linguistiche del *cimborrio* di Zamora, che potrebbero essere state introdotte nel Duero dalle manovalanze di ritorno dalla Guerra Santa¹⁹¹.

L'ipotesi che i torrini angolari siano stati aggiunti alla fabbrica in corso d'opera, benché non documentata nelle fonti archivistiche, è stata ripetutamente avanzata dagli studiosi; indizi a sostegno di tale ipotesi sono le variazioni di altezza e passo tra gli archetti a rincassi del tamburo e quelli che sorreggono i coronamenti dei torrini. Che si tratti di un intervento in corso d'opera è ancor più evidente se si osserva il tamburo dall'interno: la presenza di graffe di ferro tra i conci del coronamento, presumibilmente riconducibili a un primo tentativo di consolidamento avviato a seguito del manifestarsi delle prime consistenti lesioni, ha condotto Gomez Moreno ad avanzare l'ipotesi che l'innesto dei torrini nel tamburo della cupola sia avvenuto quando la fabbrica era stata completata fino all'altezza della cornice sopra gli archetti [fig. 47].



Figura 47; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, interno del tamburo; si notino le graffe metalliche poste tra i conci dell'ultimo anello.

Sugli assi principali furono inserite, con funzione di contrafforti, le terminazioni rette aggettanti: a tali strutture era affidato il compito di arrestare le lesioni ed equilibrare le componenti orizzontali delle spinte orizzontali trasmesse dalla calotta lungo gli assi principali della fabbrica¹⁹².

La configurazione del *cimborrio* rimase pressoché invariata per diversi secoli; durante il 1621, Bartolomé de Oviedo intervenne sulle finestre del tamburo, al fine di aumentare la luminosità interna della crociera; pochi anni più tardi, per preservare la copertura della cupola dall'erosione, si ricoprirono le squame esterne con un mastice bituminoso e in seguito con calce cementizia [fig. 48]. Tali strati sono stati rimossi solamente in tempi recenti, a seguito di un restauro¹⁹³.

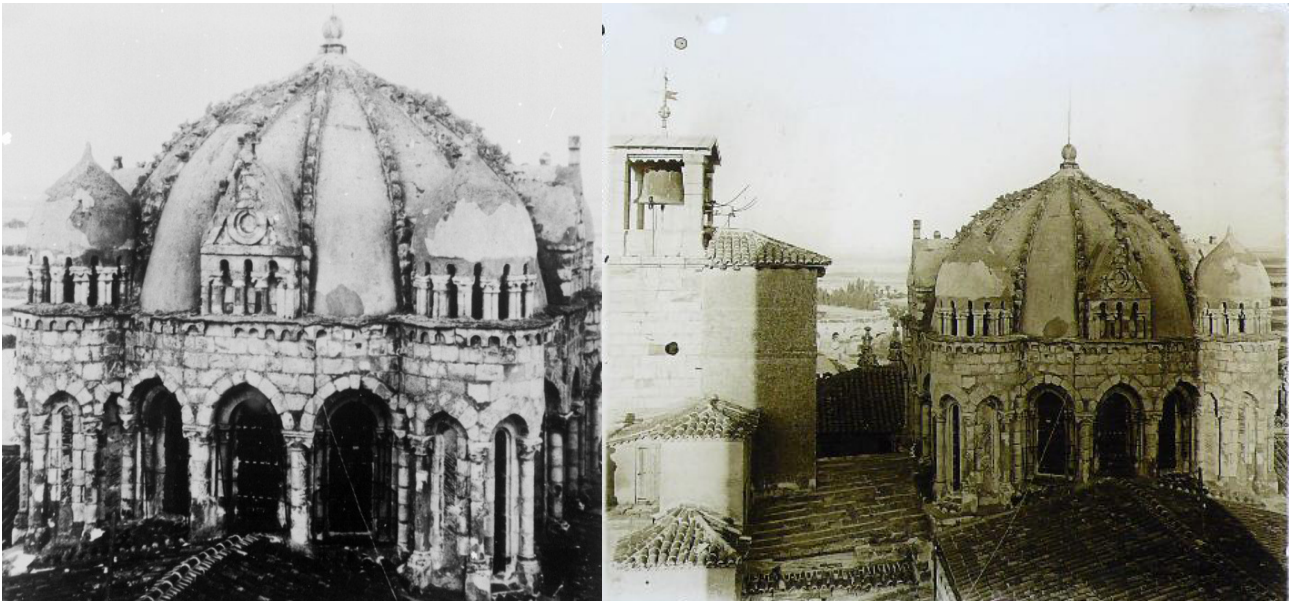


Figura 48; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, la cupola in due fotografie di inizio Novecento; si noti il rivestimento in calce che occulta l'intaglio della calotta.

4.3.2 La cupola della Catedral de Santa Maria De La Sede o Catedral Vieja di Salamanca

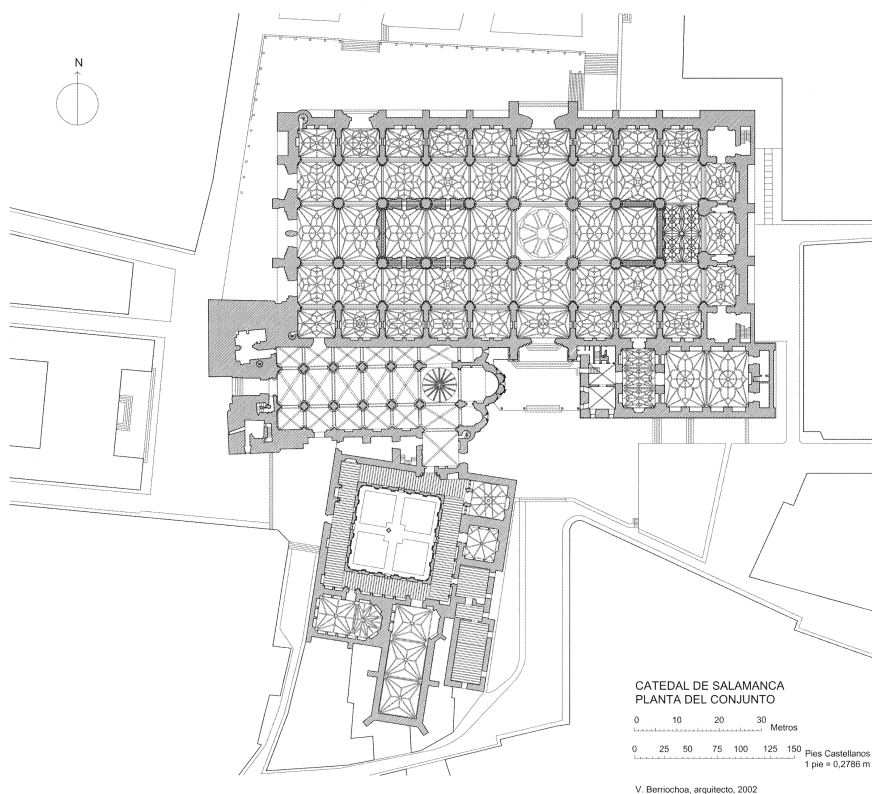


Figura 49; Salamanca, Catedral Vieja, pianta dell'intero complesso cattedralizio (BERRIOCHOA).

Il complesso delle cattedrali di Salamanca è uno tra i più raffinati esempi di convivenza e sovrapposizione tra manufatti di epoche distinte. Due edifici dalle caratteristiche formali differenti convivono nella medesima area e sono arricchiti da spazi e pertinenze di notevole pregio architettonico e artistico. La cattedrale di *Santa Maria De La Sede*, meglio nota come *Catedral Vieja*, viene edificata a partire dalla metà del XII secolo; come in buona parte dei cantieri europei, i lavori per la sua edificazione si protraggono per un periodo molto ampio, e, considerando anche gli edifici di pertinenza, abbracciano circa 250 anni. Quando, alla fine del Quattrocento, il Capitolo della cattedrale manifesta l'esigenza di costruire una sede più grande, si opta, contrariamente a quanto accade generalmente, per mantenere pressoché intatta la vecchia costruzione, e così garantire lo svolgimento della liturgia durante i lavori.

La *Catedral Vieja* ha una pianta a croce latina con tre navate e terminazione a tre absidi [fig. 49]; le absidi, dal profilo semicircolare e catino emisferico, si innestano nel transetto per mezzo di una campata sopraelevata, coperta da una volta a sesto acuto [fig. 50]; il braccio sud del transetto è suddiviso in due campate, coperte da elaborate volte a crociera [fig. 51]; sull'ultima campata si aprono tre porte, a est, sud e ovest, che conducono rispettivamente all'area esterna dietro le absidi,



Figura 50; Salamanca, Catedral Vieja, volta a sesto acuto che copre l'anti-corò; tale manufatto è al centro di un dibattito tuttora in corso riguardante alcune delle vicende costruttive della fabbrica.

denominata *Patio Chico*, al chiostro e alla sagrestia; il braccio nord del transetto è interrotto da una parete che la fabbrica condivide con la *Catedral Nueva* [fig. 52]. In epoca antecedente le due cattedrali erano collegate da un varco aperto nella parete di fondo del transetto; una scala consentiva di superare il dislivello tra le due fabbriche; alla fine degli anni Cinquanta dello scorso secolo tale varco veniva chiuso e sostituito da un nuovo accesso aperto in una delle campate della navata nord.



Figura 51; (in alto) Salamanca, Catedral Vieja, una delle due volte che coprono il braccio sud del transetto.

Figura 52; (a sinistra) Salamanca, Catedral Vieja, braccio nord del transetto e navata laterale; volte a crociera interrotte dal muro meridionale della Catedral Nueva.

Figura 53; Salamanca, Catedral Vieja, esterno della cupola o Torre del Gallo.

Le tre navate sono dotate di cinque campate, coperte con crociere costolonate su archi acuti e sostenute da pilastri cruciformi; le campate della navata centrale sono di forma rettangolare, allungate in direzione nord-sud, mentre le campate delle navate laterali hanno pianta pressoché quadrata; i muri della nave centrale superano in altezza le coperture delle navate laterali. Tali pareti sono sostenute all'esterno da contrafforti. La facciata della cattedrale è chiusa da due possenti torri: la *Torre Mocha* a sud, consente l'accesso al museo, mentre la *Torre de Campanas* a nord, si trova tra le due cattedrali.

All'intersezione tra la navata centrale e il transetto è collocata la cupola su tamburo e pennacchi. Il tamburo ha una sezione circolare ed è serrato sulle diagonali della crociera da quattro torrini angolari. A differenza della soluzione di Zamora, a Salamanca il tamburo si sviluppa su due ordini [fig. 53], divisi sia all'esterno che all'interno da una cornice continua; all'esterno



lo spazio è scandito da colonnine addossate al paramento murario, sulle quali si impostano archetti a tutto sesto messi in risalto da raffinati modani a sezione circolare; nell'ordine superiore del tamburo si aprono sedici finestre per l'illuminazione della crociera; nell'ordine inferiore, buona parte delle finestre è stata tamponata agli inizi del secolo scorso a seguito di consolidamenti strutturali. Anche le masse dei torrini riprendono la struttura ad archetti su colonne in due ordini e i motivi decorativi del tamburo. Come a Zamora, sugli assi principali del tamburo si innestano quattro parallelepipedi decorati con una rielaborazione del motivo a rincassi e terminazione a timpano. All'interno, il tamburo presenta un doppio ordine di colonne che scandiscono lo spazio circolare [fig. 54]; tra le colonne è riproposto il medesimo motivo ad archetti e colonnine presente all'esterno. Sul tamburo si imposta una cupola a doppia membrana, avente un profilo emisferico all'interno e una configurazione più snella e slanciata all'esterno; all'interno, lo spazio è scandito dai costoloni a profilo circolare che separano le vele *gallónade*; la calotta esterna presenta una decorazione a squame del tutto simile a quella della cupola di Zamora; tale decorazione viene riproposta nei coronamenti dei torrini.

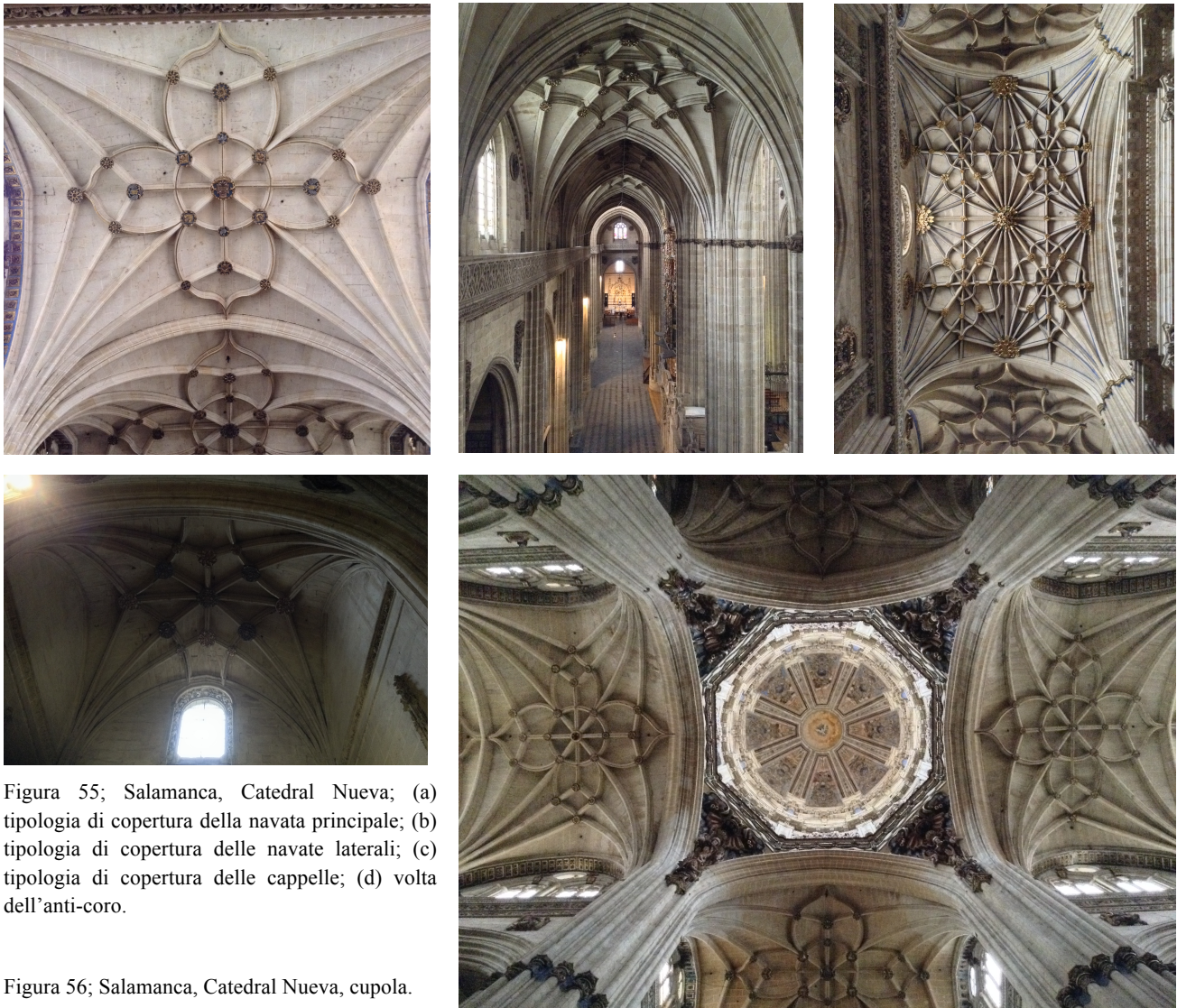


Figura 54; Salamanca, Catedral Vieja, interno della cupola.

La *Catedral de la Asunción de la Virgen*, meglio nota come *Catedral Nueva* di Salamanca, mantiene il medesimo orientamento della *Catedral Vieja* ed è inscritta in un'area rettangolare di 400x200 piedi; la fabbrica possiede una configurazione a deambulatorio, con navata centrale a campate rettangolari, due navate laterali a campate quadrate e due corpi minori con campate a pianta quadrata, che ospitano due file di cappelle laterali; il transetto si innesta all'altezza della sesta campata e in entrambe le terminazioni si aprono due ingressi della chiesa. La *cabecera* ha una terminazione piatta dotata di absidiole e torri mozze. Sei campate della nave centrale, opportunamente delimitate da partizioni murarie poco elevate, ospitano il coro e il presbiterio. Sul lato sud, un corpo addossato alla fabbrica ospita la sacrestia. Il paramento murario della navata principale è scandito da pilastri polistili e suddiviso su tre ordini: nell'ordine superiore si aprono due bifore, mentre nell'ordine intermedio si apre una trifora.

Trattazione a parte meriterebbero le volte *estrelladas* con chiavi pendule che coprono l'intera fabbrica; in questa sede ci si limiterà a descriverne brevemente le caratteristiche: le campate della navata centrale e del transetto sono coperte dal medesimo tipo di volta a ventuno chiavi, dalla configurazione a quadrifoglio, formata da ventagli di costoloni che si diramano dai pilastri a nastro e da *nervios combados* che collegano e

arricchiscono il telaio principale [fig. 55.a]; nelle campate delle navi laterali si alternano due tipologie di volte stellate, che presentano variazioni formali nella disposizione dei *nervios combados* [fig. 55.b]; le soluzioni variano ulteriormente nelle cappelle laterali [fig. 55.c]; infine, di grande complessità e ricercatezza formale è la soluzione adottata nella campata tra il presbiterio e l'abside centrale [fig. 55.d]. All'intersezione tra navata centrale e transetto si imposta la cupola su tamburo ottagonoo e pennacchi [fig. 56].



Anche in questo caso le vicende costruttive dell'antica cattedrale non sono state del tutto chiarite; buona parte delle informazioni sulla cronologia della fabbrica e sui protagonisti coinvolti nel cantiere sono desumibili da fonti documentarie custodite presso l'*Archivo de la Catedral de Salamanca*, l'*Archivo Diocesano* e l'archivio nazionale; l'assenza di informazioni puntuali sulle vicende costruttive, ha spinto gli studiosi a basare le proprie analisi sugli aspetti morfologici e sugli apparati decorativi del manufatto, al fine di proporre datazioni compatibili con l'evoluzione delle scelte linguistiche in aree limitrofe.

Secondo Julio González¹⁹⁴, l'attuale cattedrale sorge su un più antico edificio religioso, edificato dopo la riconquista dei territori castigliani nella terza decade del X secolo. Tale ipotesi si basa sull'analisi delle prime note documentarie relative ad un edificio religioso, risalenti al 22 giugno 1102; il documento riguarda una concessione del conte Raimondo di Borgogna in favore del vescovo Jerónimo Visque de Périgord¹⁹⁵ per

la ripopolazione di un quartiere noto come *Puerta del Río* (l'attuale sito sul quale sorge la cattedrale) e per la «*restaurationem ecclesie Sancte Marie, Salmantina sedis*». Sul documento si legge inoltre:

*Damus et concedimus vobis hec, ut plantetis et ipsam ecclesiam secundum vestrum posse edificatis sicut melius potueritis.*¹⁹⁶

Studi più recenti hanno chiarito che il termine *restaurationem*, che in prima analisi potrebbe far pensare a interventi di riparazione e ricostruzione non meglio precisati, è usato con una valenza simbolica per riferirsi alla necessità di

restablecer en la ciudad el culto a la Santísima Virgen, que se habría perdido con la invasión musulmana. Para afianzar dicho culto decidieron levantar un edificio o catedral, dedicado a la Virgen, y que antes no existía.¹⁹⁷

La concessione del 1102 viene riconfermata nei decenni successivi da analoghi documenti a firma dei sovrani di León, che accordano ulteriori donazioni e privilegi; il più rilevante¹⁹⁸, promulgato nel 1137 dal sovrano Alfonso VII, assegna un terzo delle rendite provenienti dalle tasse della città al vescovo Berenguer e conclude in favore di quest'ultimo il prolungato gioco di potere del *Cisma de Salamanca*¹⁹⁹. Le donazioni regie proseguono ancora tra il 1144 e il 1149. Sebbene tali documenti non facciano riferimento alla costruzione di una nuova cattedrale, i privilegi concessi avevano permesso di raggiungere una condizione economica tale da poterne avviare il cantiere²⁰⁰.

Nel 1150, una cospicua donazione di un facoltoso cittadino, Miguel Domínguez, signore di Zaratán, potrebbe far pensare a un imminente avvio dei lavori nella cattedrale: la somma complessiva di 500 *maravedís* donata alla chiesa, di cui 300 per una «*imagem de auro et argente super altare Sancte Marie*» e 200 «*ad illo labore Sancte Marie*», appare smisurata se confrontata ad altre compravendite dell'epoca²⁰¹; la conferma di un cantiere in piena attività arriva due anni dopo: il 23 marzo 1152: un provvedimento regio esonera dal pagamento delle imposte i venticinque operai della chiesa di Santa Maria²⁰². Il documento non chiarisce l'entità dei lavori, né tantomeno la data di avvio; è plausibile che i lavori non fossero iniziati da molto tempo, e che a ottenere tale privilegio sia stato il vescovo Berenguer, in carica fino al 1151 e figura vicina al sovrano Alfonso VII²⁰³; d'altra parte, non è da escludere che il fermento costruttivo, cui si assiste in quello stesso periodo nella vicina città di Zamora, abbia potuto innescare una competizione tra le due diocesi, culminata nell'avvio dei lavori a Salamanca.

Dopo poco più di un decennio, la costruzione delle tre absidi deve aver raggiunto le fasi conclusive; tale avanzamento è confermato da due testamenti, risalenti al 1161 e al 1163, che documentano alcuni lasciti alla cattedrale per la costruzione di un altare da posizionare in una delle absidi, e per la realizzazione di oggetti sacri (un crocifisso o un calice in argento e oro e una lampada per l'altare).

Un importante testamento privo di data, che potrebbe risalire al 1163 o 1164²⁰⁴, riporta le ultime volontà del canonico Don Vela e le donazioni per la realizzazione di un «*ciborio sic quomodo dixerit Petro Petríz que debet esse*»²⁰⁵. Negli anni, il dibattito sul significato del termine *ciborio* ha condotto a numerose interpretazioni: in primo luogo si è ipotizzato che il documento potesse riferirsi alle donazioni per la costruzione della Torre del Gallo²⁰⁶, individuando pertanto in Petro Petríz il probabile autore; il testo del documento aveva quindi condotto gli studiosi a ipotizzare che la cupola di Salamanca fosse stata edificata pochi anni prima della cupola di Zamora; tale ipotesi sarebbe stata smentita da studi successivi. Una seconda interpretazione del termine rimanderebbe alla realizzazione di un baldacchino per l'altare maggiore, la cui datazione è cronologicamente compatibile con le donazioni già citate; del baldacchino non vengono tuttavia descritte la forma, la collocazione né i materiali. Il baldacchino non viene menzionato neanche in un inventario dei beni mobili della cattedrale redatto nel 1275²⁰⁷; la ragione di tale assenza potrebbe far pensare ad un baldacchino in pietra²⁰⁸, quindi non annoverabile tra i beni mobili catalogati; tuttavia, gli studi più recenti²⁰⁹ convergono sull'ipotesi che tali fondi fossero destinati alla realizzazione di una volta,

probabilmente quella dell'anti-coro dell'abside centrale. Del resto, la stima della donazione concessa, pari a circa 60 *maravedis*, e il probabile completamento delle pareti delle absidi, rimandano con buona probabilità all'esigenza di concludere l'area della *cabecera* per garantire la celebrazione del culto²¹⁰. Valentín Berriochoa ipotizza che l'episodio del testamento di Don Vela sia frutto di una vicenda costruttiva complessa; dall'osservazione del manufatto sembrerebbe che l'abside centrale sia stata ampliata in corso d'opera, al fine di equilibrare più efficacemente le spinte provenienti dalle strutture murarie superiori; tale ampliamento, secondo Berriochoa, sarebbe conseguente alla decisione di voltare l'anti-coro con la volta a sesto acuto, al fine di raggiungere una quota più alta rispetto alla soluzione di progetto; le spese impreviste che ne conseguirono, avrebbero spinto il canonico a garantire la realizzazione di tale *ciborio* (la suddetta volta) attraverso un lascito testamentario²¹¹.

Tornando al ruolo di Petro Petriz, il suo nome era già apparso nel testamento di Miguel Domínguez (1150), di cui era nipote; ancora nel 1164, nel 1173 e nel 1176 è presente come testimone in altre donazioni relative alla fabbrica, e nel febbraio 1179 è citato come «*magistro Petro de illa opera de Sancte Marie*»²¹². Si tratta probabilmente del medesimo *maestro Petro*, il cui nome appare ancora in documenti del 1182 e del 1202, benché il suo ruolo all'interno del cantiere della cattedrale non sia stato chiarito del tutto²¹³. In assenza di altre notizie documentarie, e considerata la fiducia che in lui ripone il canonico Vela, recenti studi concordano nell'individuare in Petro Petriz il responsabile dei lavori nelle absidi²¹⁴. Non è tuttora noto se prima di lui siano intervenuti altri maestri per il tracciamento dell'opera e la definizione del progetto iniziale²¹⁵.

Dal 1175 al 1185 le energie impiegate nel complesso della cattedrale sembrano migrare dalla chiesa al chiostro. Già nel 1161 i monaci avevano acquistato un *palacium* che, stando agli studi di Julio González²¹⁶, era situato nell'area dell'attuale costruzione; i lavori per il chiostro sarebbero iniziati solo quindici anni più tardi, secondo l'interpretazione di un documento che ratifica la confisca di edifici che insistevano su quell'area e la loro concessione al capitolo della cattedrale (1175)²¹⁷. Certo è che i lavori nel chiostro sono ancora in corso tre anni dopo, come testimoniato da una donazione fatta «*ad opus claustris Salamantini*»²¹⁸, e che sembrano prossimi alla conclusione già nel 1185, stante l'assenza di analoghi riferimenti nelle successive donazioni, concesse in cambio di sepolture in quegli stessi ambienti²¹⁹.

Dal 1185 riprende la costruzione della chiesa, che prosegue fino al 1207, come dimostrato da documenti risalenti agli anni 1199, 1200 e 1207: il primo documento è il rinnovo del privilegio fiscale già concesso agli operai nel 1152²²⁰; il secondo riguarda l'acquisizione di un edificio che ostacola la costruzione della chiesa²²¹; il terzo documento è sottoscritto da «*Sancius Petri magister operis Sancte Marie*». Poco è noto sull'attività di questo nuovo maestro, che Julio González ritiene figlio del già citato Petro Petriz²²²; è noto invece che diciotto anni più tardi, nel 1225, un nuovo maestro, tal Johan Franco, aveva già preso il suo posto²²³. Dall'inizio dei lavori un gran numero di operai sono citati al fianco dei maestri nelle raccolte documentarie della fabbrica, pur senza una precisa indicazione sulle opere eseguite; nel 1164 appare lo scultore Gundisalvus; nel 1182 il *pedrero*²²⁴ Pedro Esteban, che lavora sotto la direzione di Petro Petriz; nel 1203 un *magister Johannes el pedrero*, individuato in un documento successivo come *maestro de canteria*; nel 1214 un *Johanne de Ispania carpentero* e infine, nel 1224, un *Mateus carpentero*²²⁵. La presenza costante di un folto e diversificato numero di operai e maestri nell'orbita della fabbrica dimostra la frenetica attività costruttiva di quegli anni; ciò confermerebbe la data del 1225 come termine dei lavori nella chiesa e nel chiostro. Ovviamente il cantiere continuava a crescere durante i secoli successivi, fino all'avvio dei lavori per la nuova cattedrale nel 1491²²⁶. Prova di tale continua attività è un documento del 1363, con il quale il vescovo Alfonso Barsaque fonda una confraternita per il sostentamento economico della chiesa, visti i non meglio precisati lavori ancora da eseguire²²⁷; una seconda confraternita, denominata *de la obra de la Virgen Santa Maria*, è fondata trent'anni più tardi per finanziare opere di riparazione in alcune aree particolarmente danneggiate, tra cui i pennacchi della cupola²²⁸.

Sebbene la documentazione archivistica non fornisca dati certi sulla datazione delle opere della cattedrale, gli studi sul manufatto hanno consentito di stabilire una cronologia di riferimento²²⁹, che nella più recente

formulazione prevede tre fasi²³⁰: la prima che comprende il periodo 1150-1175; la seconda dal 1175 al 1200; la terza dal 1200 al 1225. Tali periodi corrispondono a vicende costruttive talvolta travagliate e caratterizzate da numerose varianti al progetto originario; d'altra parte ciò è comprensibile considerando che il cantiere della cattedrale è affidato a più *maestros de la obras*, che operano in distinti momenti; da ciò deriva un progressivo adattamento di quanto già costruito alle scelte progettuali successive.

Durante la prima fase costruttiva viene tracciata la pianta della fabbrica, si costruiscono le pareti laterali della chiesa e le tre absidi, raggiungendo la quota delle finestre; la letteratura chiarisce che i lavori iniziano contemporaneamente dalle absidi e dalla facciata della chiesa; come detto, a seguito della variante al progetto per la copertura dell'anti-coro, il catino absidale deve essere ampliato; per equilibrare i carichi delle strutture superiori sono aggiunti contrafforti e incrementati gli spessori murari. Non appena completata la *cabecera* si realizza una copertura temporanea²³¹ sopra l'altare maggiore e sul transetto, al fine di garantire lo svolgimento delle celebrazioni liturgiche.

La seconda fase costruttiva ha inizio con la costruzione del chiostro, conclusa nel 1185; dopo tale data i lavori riprendono sul transetto e sulla copertura delle navate²³², escludendo la cupola; una nuova modifica al progetto originario conduce alla soprelevazione delle pareti nella navata e nel transetto; viene modificata la tipologia delle coperture delle navate, poiché il cambio di lessico nelle scelte progettuali e negli apparati decorativi impone un adattamento delle strutture precedentemente ultimate. Dall'esame di alcune peculiarità costruttive delle volte e dei temi figurativi degli apparati decorativi si deduce che le crociere del transetto e le prime due crociere della navata centrale (le più prossime all'abside) vengono costruite tra il 1185 e il 1195²³³, mentre nei cinque anni successivi vengono realizzate le prime due crociere della nave laterale.

Durante la terza fase costruttiva (1200-1225) si completano le volte e si costruisce la cupola; secondo il progetto originario, all'intersezione tra navata e transetto doveva sorgere una volta a crociera costolonata, come testimonia la presenza di tre statue innestate alla base dei pennacchi e aventi funzione di peducci per i costoloni [fig. 57]; una simile soluzione viene compiutamente realizzata in una delle volte del transetto [fig. 58]. La ragione di un così drastico cambiamento nel progetto originario è imputabile probabilmente alla notorietà della soluzione che in quegli anni veniva sperimentata con successo nella vicina Zamora, e all'acquisita consapevolezza della perdita di luminosità nelle chiese dove era stata adottata la



Figura 57; Salamanca, Catedral Vieja, dettaglio della cupola; si noti il peduccio innestato nella muratura.



Figura 58; Salamanca, Catedral Vieja, copertura della prima campata del braccio sud del transetto; si noti il sistema compositivo di volta a crociera e peduccio antropomorfo.

soluzione a volta.

In assenza di adeguate fonti documentarie, anche in questo caso la ricostruzione delle vicende costruttive della cupola è affidata prevalentemente all'osservazione dell'opera. Si è già chiarito che questa cupola viene costruita dopo quella di Zamora, come confermano le scelte linguistiche degli apparati decorativi. La volontà di superare in prestigio la città rivale spinge il Capitolo della cattedrale di Salamanca ad adottare una soluzione tanto raffinata quanto ardita: la Torre del Gallo emula il modello di Zamora, rielaborandolo in una veste più slanciata e complessa, dotata di un profilo allungato e di un doppio ordine nel tamburo²³⁴. Camón Aznar ipotizza che la costruzione della cupola sia avvenuta tra il 1180 e il 1200²³⁵ sotto la direzione dell'ultimo maestro della cattedrale (il sesto, secondo la sua ipotesi), e fissa il termine della costruzione della cupola di Zamora al 1174. Ulteriori studi hanno condotto a ipotizzare che il completamento della cupola di Zamora sia avvenuto a ridosso della fine del XIII secolo, spostando così in avanti di qualche decennio anche la datazione della cupola di Salamanca.

L'analisi dei gruppi scultorei nei capitelli della cupola ha condotto gli studiosi²³⁶ a ipotizzare che i lavori siano stati avviati tra il 1200 e il 1210, durante il vescovato di don Gonzalo (1199-1226); tale ipotesi è compatibile con la datazione delle volte del transetto (fine della seconda fase costruttiva) ed è in linea con la prassi costruttiva dell'epoca, che rimandava alle fasi conclusive le delicate questioni sulla realizzazione della copertura della crociera.

Alcune note sugli aspetti costruttivi hanno permesso di rintracciare informazioni sulle vicende del cantiere e sulla configurazione della calotta esterna, che sembrerebbe essere stata modificata in almeno due occasioni successive²³⁷: durante un restauro, eseguito tra il 1904 e il 1925²³⁸, la cupola è stata smontata e rimontata interamente; come nella cupola di Zamora, anche a Salamanca si è potuto così constatare che nella cupola di Zamora, come in quella di Salamanca, lo spazio tra le due calotte era stato riempito da un composto di calce e pietre [fig. 59], all'interno del quale sono stati rinvenuti conci intagliati con motivi decorativi che si ritengono successivi alla stessa costruzione della cupola²³⁹; la presenza di tali conci condotto gli studiosi a ipotizzare che un'analoga operazione di smontaggio e anastilosi, finalizzata a conferire alla cupola un profilo più slanciato, sia stata eseguita nell'ultima decade del XIII secolo²⁴⁰.

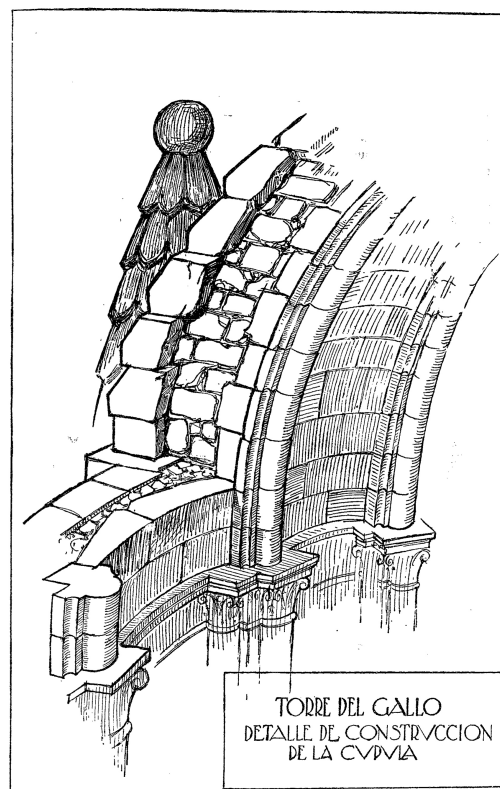


Figura 59; Salamanca, Catedral Vieja, schema costruttivo della cupola che mostra i tre strati della copertura (GARCÍA GUERETA 1922, op. cit., p. 136).

4.3.3 La cupola della Colegiata de Santa María la Mayor a Toro

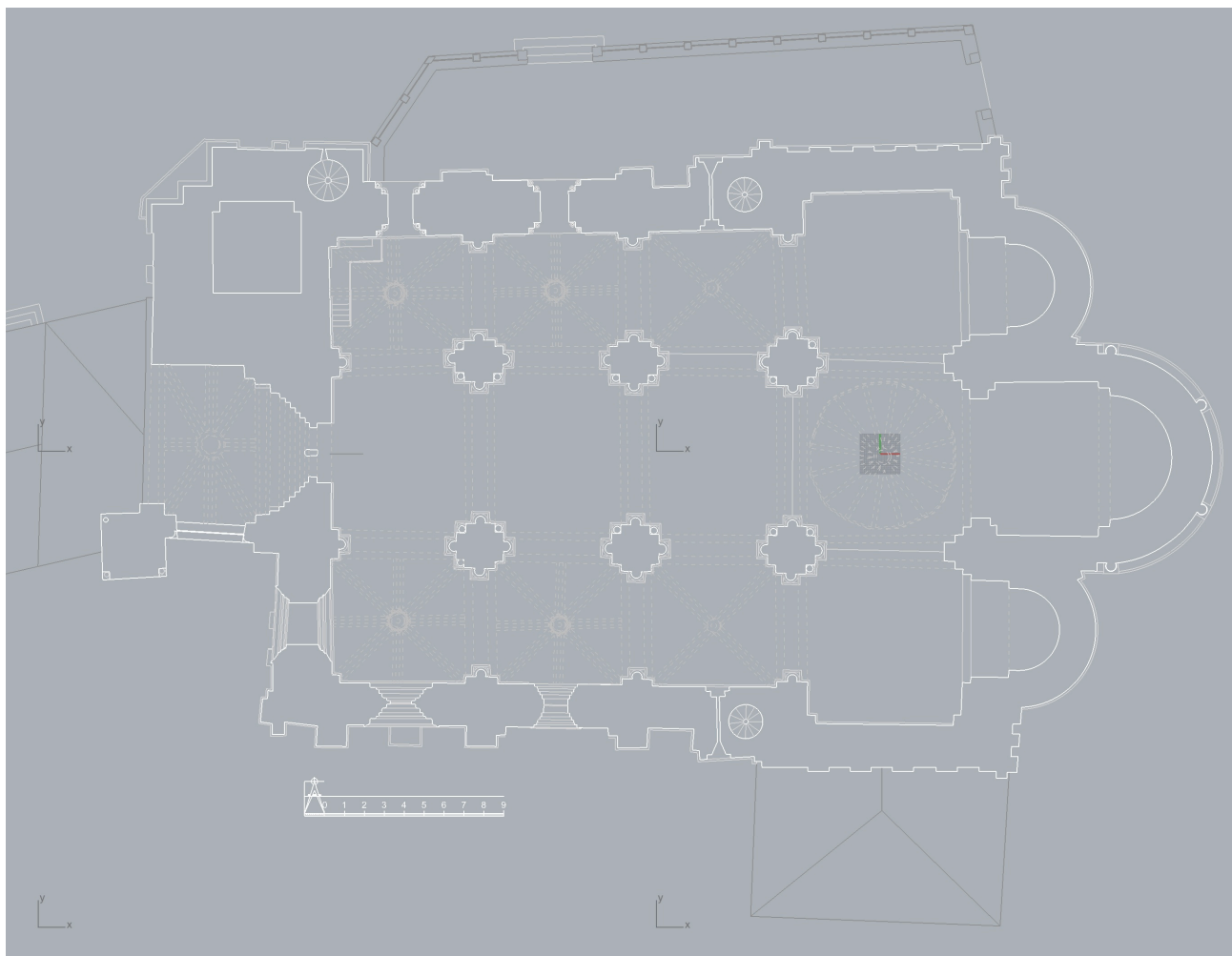


Figura 60; Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, pianta (CASASECA BENEITEZ)

L'assetto planimetrico della collegiata di Toro rispecchia, seppur con alcune differenze, quello del primo progetto della cattedrale di Zamora; la chiesa ha pianta a croce latina con transetto leggermente aggettante, tre navate divise in tre campate e una terminazione tri-absidata [fig. 60]; le absidi semicircolari si innestano sul transetto per mezzo di campate rettangolari e sul fronte esterno presentano una partizione in due ordini, poggianti su uno zoccolo leggermente aggettante; il primo dei due ordini è cieco e presenta nella sola abside centrale un motivo decorativo ad archetti a tutto sesto; più elaborato è il motivo decorativo del secondo ordine, composto da una serie di archi su colonnine addossate; nell'archetto centrale si apre una finestra, che è poi riproposta, a meno del motivo decorativo, anche nelle absidi laterali [fig. 61]. La fabbrica dispone di tre accessi: il principale è collocato sulla fronte ovest, nel *Pórtico de la Majestad*;; gli altri due ingressi sono disposti sull'asse trasversale della fabbrica, in prossimità delle campate centrali delle navate. All'angolo nord-ovest sorge l'imponente torre campanaria a pianta quadrangolare e terminazione ottagonale. Sul lato nord la presenza del transetto è evidente, più che per l'aggetto del corpo di fabbrica, per la configurazione della fronte, che svetta rispetto alla navata laterale, ed è arricchita da un elaborato rosone; sul braccio sud del transetto, sotto un analogo rosone, si innesta la sacrestia a pianta rettangolare.

La navata centrale e il transetto sono coperti da volte a sesto acuto scandite da archi di analogo profilo; le tre absidi dispongono di volte emisferiche in pietra a faccia vista [fig. 62]; la *capilla mayor* è coperta da una volta a sesto acuto che contribuisce a dare continuità alle coperture della navata, mentre le due cappelle minori, che separano le absidi dal transetto, sono coperte con volte a botte. Sulla prima campata delle navate laterali si trovano volte a crociera con costoloni a tutto sesto; le rimanenti campate sono voltate con crociere costolonate a otto vele dal profilo acuto.

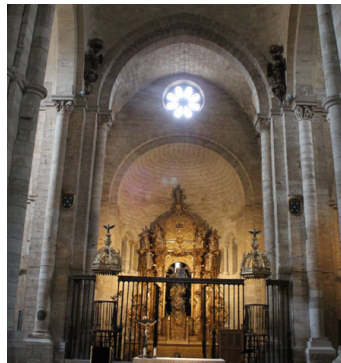


Figure 61, 62a, 62b; Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, viste esterna e interna delle absidi; si noti la configurazione emisferica della calotta in pietra,

Figure 63, 64; Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, viste della cupola.

Sui pennacchi della crociera si imposta un tamburo su due ordini dal profilo poligonale a sedici lati [fig. 63]. All'interno del tamburo, le aperture sono incorniciate da un sistema di tre colonne addossate, che sostengono archetti polilobati; sul secondo ordine si imposta una calotta a profilo emisferico con costoloni [fig. 64] che, a differenza dei due modelli precedenti, è realizzata in mattoni. All'esterno il medesimo motivo ad archetti polilobati su semicolonne addossate caratterizza le aperture dei due ordini; i torrini sono trattati con un diverso tema decorativo, più simile alla cupola di Salamanca per la presenza di uno stipite a sezione torica e, limitatamente al secondo ordine, di un motivo a sfere in rilievo che ripercorre il profilo degli archetti. Gli estradossi della calotta e dei torrini sono protetti da falde triangolari ricoperte da tegole e aggiunte in occasione di un restauro successivo.

Sulle origini della *Colegiata* si hanno poche notizie documentarie, a causa della sostanziale scomparsa degli archivi medievali e di età moderna. A ciò si aggiungano le perdite dovute all'incendio che nel 1761 ha distrutto l'intero archivio municipale della città, e lo smantellamento, nel XIX secolo, dei fondi delle istituzioni religiose²⁴¹.

Secondo alcune ipotesi²⁴², non ancora verificate da adeguate indagini archeologiche, l'*Iglesia Mayor* sorgerebbe su un più antico edificio religioso del X secolo, che occupava la parte meridionale della collegiata.

Il primo documento noto sulla chiesa risale al 1139: si tratta della donazione con la quale Alfonso VII cede la cittadina di Fresno de la Ribera alla chiesa «*Sancte Marie que fundatur in Taura*»²⁴³ e al vescovo di Zamora Bernardo. Con buona probabilità la donazione doveva servire a finanziare la costruzione della chiesa, che tuttavia sarebbe avvenuta alcuni decenni più tardi, forse a causa delle lotte di potere tra le diocesi vicine e della perdurante instabilità politica che caratterizzava in quegli anni l'area del Duero.

La data di inizio dei lavori, desunta ancora una volta sulla scorta di analisi comparative, viene fissata all'ultimo quarto del XII secolo (1170 circa), in concomitanza con la necessità di fortificare la cittadina della frontiera, all'indomani della separazione dei regni di Castiglia e León; durante questo periodo viene infatti edificata una poderosa cinta muraria per volontà del sovrano Ferdinando II (1157-1188) e viene promossa una più generale campagna di espansione della città²⁴⁴. Questa approssimativa datazione collima con le vicende costruttive della vicina cattedrale di Zamora, che in quegli anni sembrerebbe ormai prossima alla conclusione; questo avvicendamento tra i due cantieri potrebbe spiegarsi con la volontà del vescovo Esteban di riaffermare l'appartenenza di Toro alla diocesi di Zamora, promuovendo la costruzione di una grande chiesa dopo il completamento della cattedrale.

Gómez Moreno²⁴⁵ ipotizza che la costruzione della chiesa sia avvenuta in due fasi distinte a partire dagli anni Settanta del XII secolo, e sia stata affidata ad altrettanti maestri; il primo maestro, che sarebbe l'autore del progetto, realizza la *cabecera*, gli ingressi laterali, i muri perimetrali e i pilastri fino a un'altezza individuabile dall'impiego di una pietra calcarea di colore chiaro, proveniente da cave situate a nord della città. Dopo la conclusione di questa prima fase, presumibilmente nel 1188, i lavori vengono sospesi per più di mezzo secolo. La prolungata chiusura del cantiere è probabilmente dovuta alla morte del sovrano, sopravvenuta anch'essa nel 1188, e alla conseguente rottura degli equilibri politici tra i regni di Castiglia e León.

Una seconda campagna costruttiva veniva avviata nella prima metà del XIII secolo, probabilmente dopo l'unione tra i due regni fino ad allora in guerra (1230); questa datazione sembra trovare conferme nei materiali impiegati per la prosecuzione dei lavori, e in particolare nell'uso di una pietra semplice da lavorare e di colore rosa, tipica della regione salmantina. La disponibilità di una pietra proveniente dalle cave di Salamanca in un cantiere del regno di León indicherebbe la cessazione delle ostilità tra i due regni. Un primo trattato di pace, siglato nel 1220, che aveva già aperto le frontiere per il transito delle merci, rende plausibile l'arrivo in cantiere di grandi quantitativi di pietra da taglio; l'avvio della nuova fase costruttiva viene abitualmente datato a qualche anno più tardi, certamente dopo il 1225, o forse a partire dal 1230, quando le due corone si uniscono sotto il comando di Fernando Alfonso III (il Santo). In questa seconda campagna di lavori l'abbandono del progetto originario in favore di soluzioni più semplici, come, ad esempio, le volte a sesto acuto in sostituzione delle crociere costolonate, hanno indotto a ritenere che il nuovo maestro non fosse all'altezza del suo predecessore; a questo stesso periodo si fa risalire anche la costruzione della cupola, i cui lavori sembrerebbero conclusi nella quarta decade del secolo.

Questa ipotesi cronologica, per lungo tempo accreditata, è stata rivista e in buona parte confermata da più recenti studi; la datazione della costruzione del *Pórtico de la Majestad*, fissata alla metà del Duecento, viene contestata da alcuni studiosi che ne propongono lo slittamento a una data successiva al 1283²⁴⁶.

4.4 Cronologia e vicende costruttive delle cupole siciliane

4.4.1 La cupola della chiesa del Gesù nella Casa Professa di Palermo

Le vicende costruttive della cupola del Gesù di Palermo segnano l'avvio di una sperimentazione che, tra Cinquecento e Seicento, coinvolge nell'isola numerosi protagonisti interni ed esterni alla Compagnia e si

basa prevalentemente sul meccanismo di prova ed errore; negli anni di attività del cantiere, infatti, si verificano crolli parziali e successive ricostruzioni, oltre a un avvicendamento di protagonisti e maestranze non sempre adeguatamente documentato.

Il primo progetto della chiesa del Gesù è del fratello architetto Giovanni Tristano²⁴⁷, entrato nell'ordine nel 1556 e divenuto due anni più tardi il primo *consiliarius aedificiorum* gesuita. Tristano giunge in città nel dicembre 1563 (o i primi di gennaio 1564) con l'incarico di progettare una nuova e più ampia sede della Compagnia; almeno in due occasioni documentate²⁴⁸, infatti, la chiesa nell'abbazia di Santa Maria della Grotta, che ospitava le celebrazioni dell'ordine, era risultata troppo piccola per ospitare il crescente numero di fedeli.

Un disegno custodito presso la *Bibliothèque nationale de France*²⁴⁹ raffigura il primo progetto della nuova chiesa, avente pianta a navata unica con cinque profonde cappelle per lato, un transetto non pronunciato all'esterno e una terminazione absidale piatta [fig. 65]; è probabile che tale soluzione sia ispirata ai primi progetti del Gesù di Roma²⁵⁰, e preveda una copertura della navata a capriate lignee²⁵¹ e controsoffitto a cassettoni²⁵². In questa sede, ciò che di questo disegno interessa maggiormente è l'area della crociera, nella quale è rappresentata la proiezione del tamburo ottagonale in tratteggio.

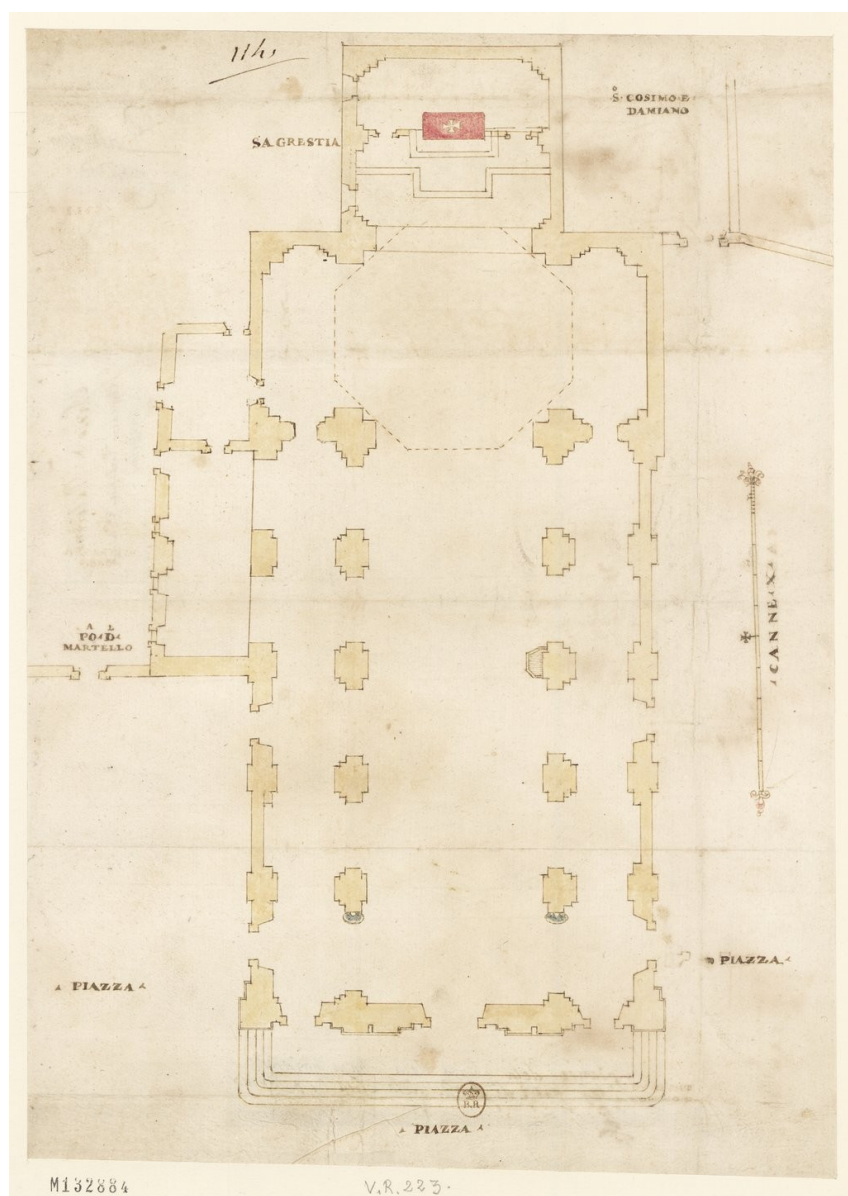


Figura 65; Giovanni Tristano, pianta della di Casa Professa di Palermo, 1564. Sul recto si leggono le originali indicazioni toponomastiche; sul verso del documento si legge: *Palermo Ch.a. di Palermo. Delineatio ecclesiae domus professae. Pianta della chiesa della chasa professa deli patri di Iesù de la città di Palermo*. Il disegno, edito in numerosi testi, è custodito presso la Bibliothèque nationale de France (B.n.F.), Hd-4, n. 114; V.R. 223, disponibile online all'indirizzo riportato in sitografia ref. [7].

Il progetto deve essere stato approvato in tempi assai rapidi se in poco meno di tre mesi dall'arrivo di Tristano a Palermo si apre già il cantiere, con la posa della prima pietra avvenuta il 12 marzo 1564²⁵³; in agosto i lavori sembrano procedere celermente e senza grossi problemi (si completano quattro delle cappelle del fronte settentrionale²⁵⁴), tanto da permettere a Tristano il rientro a Roma alla fine dello stesso anno. Il 2 marzo 1565, la chiesa, pur non ancora completata, viene aperta al culto²⁵⁵. Due anni più tardi vengono ultimate tutte le cappelle laterali²⁵⁶ e i lavori si spostano nell'area della crociera e dell'abside²⁵⁷.

Sebbene nei primi tempi si costruisca con ritmo incessante, grazie anche alle ingenti donazioni provenienti dal Senato e dal ceto nobile, i lavori vengono rallentati dall'inesperienza dei tecnici locali e si protraggono per oltre un decennio a causa di problemi statici legati alla costruzione della cupola. Per tale ragione, più volte il padre provinciale chiederà il ritorno di Tristano a Palermo, richiesta che rimarrà tuttavia inascoltata. Nel 1572, quando la cupola è pressoché ultimata²⁵⁸, i problemi di stabilità non sono ancora stati risolti; il fratello Francesco Costa, che aveva assunto la direzione del cantiere dopo Tristano, viene pertanto inviato a Messina dove lo attende l'architetto Andrea Calamech, che in quegli anni è impegnato nell'edificazione della Casa Professa di quella città e che potrebbe fornire valide indicazioni per una rapida soluzione del problema²⁵⁹; al rientro del fratello Costa la questione sembra tutt'altro che risolta, se nell'aprile del 1575 il padre visitatore Polanco richiede con la massima urgenza il ritorno sull'isola di Tristano, affinché possa valutare l'eventualità di una parziale demolizione della cupola, che «ha fatto in diversi luoghi risentimento»²⁶⁰. La linea operativa suggerita dal padre generale Mercuriano è quella di coinvolgere gli architetti presenti nell'isola e al contempo di inviare a Roma un fratello che possa conferire con Tristano²⁶¹; il fratello inviato è Alfio Vinci, succeduto al fratello Costa nella gestione del cantiere, che per qualche tempo sembra risolvere il problema della stabilità del manufatto e proseguire i lavori.

Alla fine degli anni Ottanta, il fratello Vinci viene nuovamente inviato a Roma, questa volta per sottoporre all'architetto gesuita Giuseppe Valeriano una nuova proposta di rinnovamento della chiesa, che prevede l'apertura di varchi nelle pareti laterali delle cappelle per ricavare due navate, soluzione completata alla metà degli anni Novanta²⁶².

Alcuni anni più tardi (1596) si registra a Palermo la presenza di Natale Masuccio (o Masucci), già architetto di grande esperienza e destinato ad entrare nell'orbita di gran parte dei cantieri gesuiti dell'isola. Secondo Maria Clara Ruggieri Tricoli, la presenza di Masuccio a Palermo segnerebbe l'avvio di una vasta campagna di ammodernamento del Gesù già dal 1597²⁶³; d'altra parte, appena un anno dopo è documentato un pagamento a una squadra di muratori per lavori non meglio precisati in una cappella della chiesa²⁶⁴. Si tratta dell'avvio di una nuova serie di riforme nella fabbrica o piuttosto degli ultimi interventi previsti nella precedente fase costruttiva? Una pianta²⁶⁵ e una sezione²⁶⁶ documentano la rilevanza della nuova campagna di lavori ideata da Masuccio [fig. 66.a-b], che prevede il prolungamento di abside e transetto con tre terminazioni semicirculari, la realizzazione di due cappelle a pianta centrica ai lati del coro e otto nuove cappelle addossate alle navate laterali. È possibile che i pagamenti registrati nel 1597 siano riferibili alla realizzazione di tali cappelle? O i lavori sarebbero iniziati qualche anno più tardi, promossi dal padre Cesare Cosso e sotto la guida dell'architetto Masuccio, così come riportato dallo storico dell'ordine Emanuele Aguilera²⁶⁷? Certo è che nel 1597 Masuccio si sposta a Siracusa per la costruzione del Collegio e torna a Palermo due anni dopo, aspetto che potrebbe indicare un avvio dei lavori a partire dalle opere meno impegnative; d'altro canto sappiamo che nel 1598 viene collocata una pala d'altare nella cappella dei Santi Confessori, la seconda tra quelle della navata destra; ciò farebbe presupporre che almeno le cappelle di sud-ovest possano già essere concluse, mentre ancora da realizzare siano quelle a nord-est²⁶⁸. L'ampliamento del transetto e della terminazione absidale sarebbe stata avviata qualche anno più tardi, tra il 1603 e il 1604²⁶⁹.

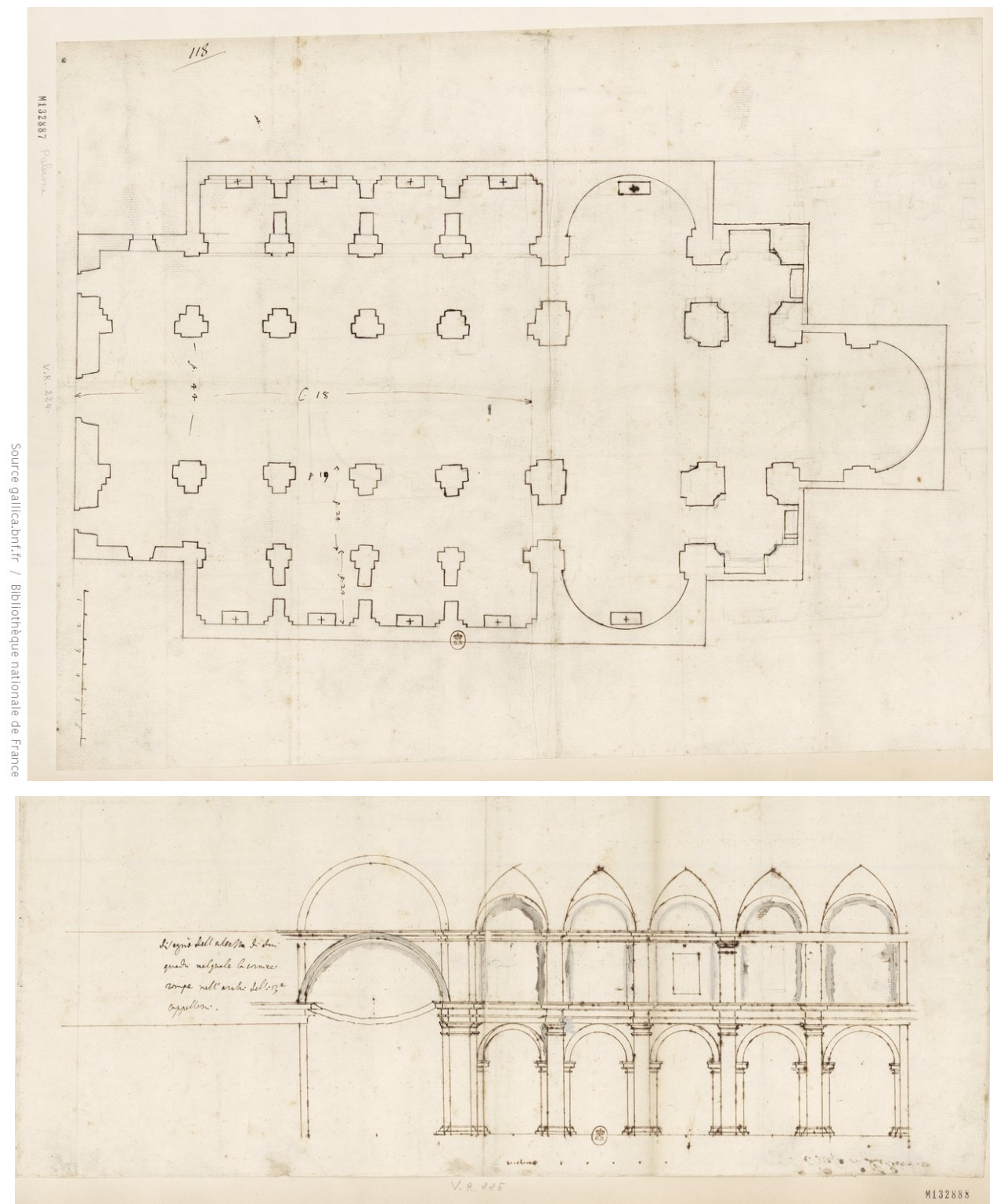


Figura 66; Natale Masuccio, pianta (a) e sezione (b) della chiesa di Casa Professa di Palermo.

Tornando alla cupola del Gesù, sebbene l'avvio dei lavori di ampliamento nel 1597 farebbe supporre che le condizioni di stabilità del manufatto non preoccupino più del dovuto, in una data compresa tra il 1590 e il 1622, ma tuttora imprecisata, la prima cupola crolla²⁷⁰. Le ragioni del crollo sarebbero attribuibili a tali nuove opere²⁷¹? Se così fosse, tale disastroso evento dovrebbe collocarsi nella prima decade del XVII secolo. Intanto, nel 1616 Masuccio viene espulso dall'ordine, mentre la direzione dei lavori è affidata al padre Tommaso Blandino, suo allievo, coinvolto anche nei cantieri gesuiti di Trapani e Catania. Nei due decenni successivi i lavori proseguono a ritmo incessante, sia sotto il profilo strutturale, sia negli apparati decorativi; negli anni Venti si predispone la ricostruzione della volta, avviata solo un decennio dopo (1632), a seguito dell'approvazione del precedente progetto di Blandino²⁷². È in questi anni che inizia la costosa opera di rivestimento marmoreo degli interni e che ricominciano i lavori per la nuova cupola. Dalle fonti archivistiche si apprendono i nomi dei protagonisti coinvolti in questa nuova fase costruttiva, tra i quali emerge, già dal 1632, Giuseppe Coculla, fabbriciere trapanese che dal 1635 è direttore della cantiere del Gesù²⁷³; suo è il progetto della nuova cupola, di cui viene prodotto un modello ligneo nell'agosto del 1632²⁷⁴; i lavori nella cupola, che richiedono un impegno economico non indifferente²⁷⁵, iniziano due anni più tardi (1634-1635), e proseguono per diverso tempo senza grosse difficoltà, grazie anche ai suggerimenti di tecnici esterni come l'architetto Agazio Stoia da Napoli (1646)²⁷⁶. Il modello impiegato per questa nuova costruzione è la cupola della cappella Sistina (o del SS. Presepio, come indicato nelle fonti archivistiche dell'epoca) in Santa Maria Maggiore a Roma²⁷⁷ [fig. 67], secondo quanto si apprende da un documento rinvenuto da Diana Malignaggi, che è utile trascrive parzialmente di seguito:

3° Si dà a V.A. anco il disegno del nostro titolo, acciò veda tanto in Napoli o in Roma se il collo o piede della cuppola è proportionato veda quanto s'haveria d'alzare per esser proportionato, le misure sono segnate nel disegno.

4° V.A. s'informi quanto ha d'essere la volta della stessa cuppola d'altezza, cioè se è meglio farla a mezzo circolo o a 3° punto, e quanto piede diritto ci si deve andare.

5° dalle misure che ho visto nel disegno del Santo Presepio di Santa Maria Maggiore mi pare che quella Cappella sia quanto è il titolo della nostra chiesa: poichè quella è larga pal. 50 e la nostra pal. 44 et essendo il palmo siciliano più lungo del romano (come V.A. potrà vedere in questo disegnato dal P. Flori nella pianta della nostra chiesa che si porta) palmi 50 Romani sono palmi 44 siciliani incirca; perciò V.A. potrà vedere se quella cappella del Santo Presepio è realmente della stessa misura, la nostra cuppola si potrà fare conforme a quella tanto il collo quanto la volta, emendandosi però qualche difetto se è in quella, e V.A. se ne pigli le misure.²⁷⁸

Dal documento e dal confronto con la cupola di Fontana²⁷⁹ si possono desumere preziose indicazioni su questa seconda cupola del Gesù; il tamburo, il cui diametro è 44 palmi, ha un profilo esterno ottagonale (così come indicato anche nel disegno di Tristano) e un profilo interno circolare; è plausibile ipotizzare che, come nella cupola di Roma, sul tamburo si aprano otto finestre per l'illuminazione della crociera; la calotta mantiene probabilmente la medesima sezione a sesto acuto e sostiene una lanterna di coronamento con cupolino; inoltre, immaginando che anche il dimensionamento delle parti resistenti sia stato desunto dal manufatto romano, in questa nuova cupola si potrebbe ipotizzare una sezione muraria del tamburo pari a 1/6 del diametro e una calotta dallo spessore variabile. Nulla ricondurrebbe alla presenza, a questa data, dei torrini angolari.



Figura 67; Roma, cupola della cappella Sistina in Santa Maria Maggiore, vista dell'esterno.

Anche questa seconda opera sarebbe crollata in una data imprecisata e ancora una volta non v'è traccia documentaria dell'evento disastroso²⁸⁰; certo è che dal 20 giugno 1654 si documenta una nuova campagna di lavori nella cupola, la terza, che vede come protagonista il padre Bernardino Lanfranchi, già presente nel cantiere durante la gestione di Coculla e che pare sostituirsi a quest'ultimo a partire dal 1642. I lavori, che sono documentati in un *giornale di cassa* della Casa Professa²⁸¹, riguardano anche le cappelle del transetto. Dalle somme impiegate e dalla schiera di manovalanze coinvolte si può presumere che i lavori siano finalizzati non tanto a semplici riparazioni, quanto piuttosto ad una ricostruzione vera e propria che prevede anche costosi apparati decorativi.

A questo proposito, una commessa dell'ottobre 1654 registrata nell'Archivio di Stato di Palermo²⁸² ha recentemente fatto luce sulle vicende costruttive di questa nuova cupola e sulla sua configurazione²⁸³; al maestro Onofrio Cosentino vengono commissionati mattoni in maiolica nei quali è raffigurato lo stemma dei gesuiti e *imbrici a piramidi* da collocare agli angoli della cupola, conformi al disegno fornito da padre Lanfranchi; come chiarisce Ciro D'Arpa, la realizzazione di tali coronamenti piramidali decorati, conferma che a questa data sono già stati realizzati i torrini angolari, «sui quali le cuspidi variopinte avrebbero realizzato un'adeguata finitura»²⁸⁴.

La notte del 25 gennaio 1655, a lavori quasi conclusi, nel cantiere del Gesù si verifica un nuovo crollo, forse causato dalle torrenziali piogge di quei giorni²⁸⁵ o dalla «soverchia fretta di mostrarla [la cupola] perfetta alla Congregazione Provinciale»²⁸⁶. Ciro D'Arpa ravvisa in un pagamento di poco successivo, riguardante un'ingente fornitura di pietra da taglio²⁸⁷, la prova che il crollo abbia interessato esclusivamente calotta e lanternino, lasciando quindi intatto il tamburo.

I lavori riprendono dopo poco tempo in un clima di giustificata apprensione, documentata dalle lettere che il padre Generale Gasvinio Nickel invia a Palermo durante tutto il periodo successivo²⁸⁸, e dalle quali si apprende che, in un primo tempo, l'incarico è affidato al fratello Paolo Parisi (*faber lignarius*, la cui preparazione sarà ritenuta insufficiente qualche tempo dopo). Durante la ricostruzione il padre Generale si raccomanda affinché sia richiesto il parere di tecnici esterni all'ordine, come era già accaduto anni prima e secondo una prassi ormai consolidata, e che le indicazioni di questi ultimi vengano seguite diligentemente;

infine nei documenti si cita un anonimo architetto, ben noto agli interlocutori, che sarebbe intervenuto direttamente nel progetto della nuova cupola.

Da questo momento, le vicende costruttive sulla cupola del Gesù rivelano un intreccio assai più ampio di quanto registrato dalle fonti documentarie, che si proverà a sintetizzare attraverso le ipotesi proposte dalla più recente letteratura.

In passato, la cupola del Gesù era stata attribuita ad Angelo Italia²⁸⁹; tale attribuzione è stata poi smentita da studi successivi. Marco Nobile individua nella figura del *peritissimo* architetto intervenuto nella ricostruzione della cupola il lucchese Francesco Buonamici (1596-1677), formatosi nel nord Italia e arrivato a Malta nel settembre del 1635, al seguito dell'ingegnere militare Pietro Paolo Floriani; a Malta, Buonamici lavora inizialmente alla revisione delle opere di fortificazione dell'isola, per poi essere incaricato della redazione di una serie di progetti della Compagnia di Gesù; pertanto, nel 1647 Buonamici è già architetto della fabbrica gesuitica di Valletta (1647), e probabilmente in quello stesso periodo riceve l'incarico per il progetto della nuova chiesa dell'Ordine a Siracusa. Altri incarichi riceverà a Messina, Palermo e Trapani negli stessi anni, tra cui la redazione di un progetto per la campagna di rinnovamento della cattedrale di Palermo, promossa dall'arcivescovo Martino de León y Cardenas (in carica dal 1650 al 1655)²⁹⁰, e solo parzialmente attuata per l'opposizione della corrente conservatrice del Capitolo; sulla datazione di tale incarico permane ancora incertezza, anche se un primo riscontro è rintracciabile nelle parole di Antonino Mongitore:

Voleva l'arcivescovo F. Martino togliere via questa cupola e rifarla in magnifica forma di pietra; ma ritrovò che il Capitolo di questo Tempio determinò a 20 novembre 1651, supplicò l'arcivescovo a non disfarla tanto per suo artificio, come per conservare quella memoria dell'antichità: e per l'istanza del capitolo, unita alla preghiera di altri, lasciolla intatta.²⁹¹

Secondo Ciro D'Arpa, l'incarico sarebbe stato assegnato a Buonamici in occasione di un concorso al quale partecipa anche l'architetto Cosimo Fanzago.

Il programma di rinnovamento della cattedrale prevedeva anche la realizzazione di una cupola per la quale gli architetti che parteciparono al "concorso" di certo elaborarono progetti dei quali però ad oggi nulla conosciamo.²⁹²

Questo radicale piano di rinnovamento sarà destinato a naufragare in breve tempo, mentre, a pochi isolati di distanza, il cantiere del Gesù è in piena attività sotto la gestione economica del già citato padre Lanfranchi. In quello stesso periodo ricopre la carica di padre Preposito il maltese Bernardino Bonici o Benici (1647-1651), in seguito citato come interlocutore del padre Generale nelle vicende riguardanti il crollo del 1655²⁹³. Da ciò appare plausibile un coinvolgimento diretto di Buonamici nel progetto della nuova cupola (dal 1654), o ancora nella ricostruzione a seguito del crollo della calotta (*post* 1655), secondo delle circostanze che si approfondiranno in seguito.

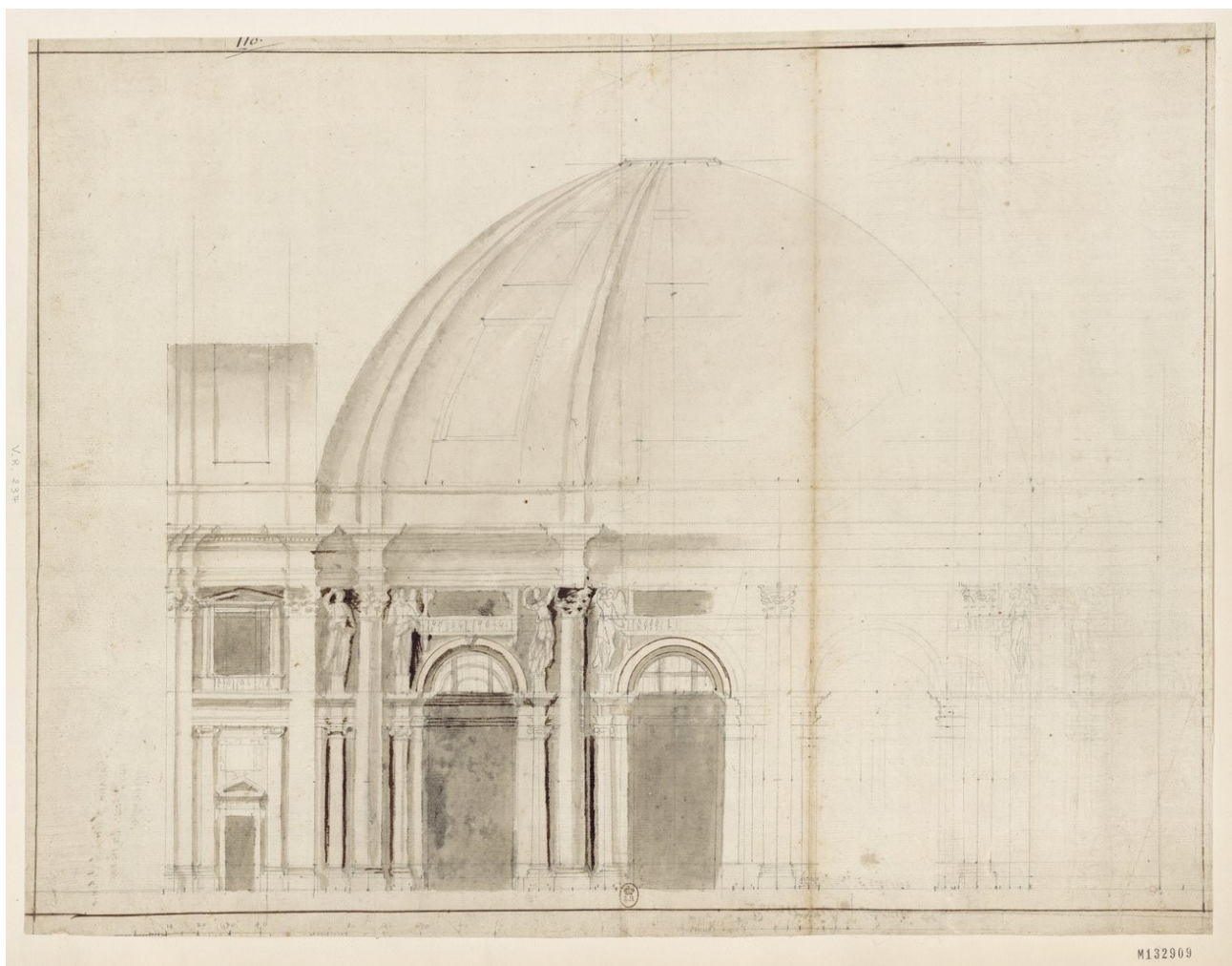
Sulla questione si è espresso anche Marco Nobile, secondo cui l'incarico del vescovo Cardenas a Buonamici deve farsi risalire all'anno 1655, in cui l'architetto si sposta da Palermo a Trapani²⁹⁴ per redigere un progetto per la facciata della chiesa della Compagnia²⁹⁵. Questa informazione è confermata da fonti archivistiche e letterarie dell'epoca, che attestano la presenza di Buonamici a Palermo in una data di poco precedente il 14 maggio 1655²⁹⁶ «per lo disegno di quella madre chiesa»²⁹⁷.

Parallelamente a queste vicende, è opportuno ricordare che proprio durante la ricostruzione della cosiddetta quarta cupola del Gesù, con una lettera del 9 settembre 1655 il padre Generale richiede al fratello Parisi il disegno del nuovo manufatto²⁹⁸, che sarebbe arrivato a Roma il 16 ottobre successivo, come confermato da una nuova lettera datata al 4 novembre²⁹⁹; da quest'ultimo documento si apprende che il disegno doveva essere corredato anche da una perizia redatta con il consulto di altri architetti, tra cui potrebbe figurare anche Buonamici. Il disegno in questione potrebbe rintracciarsi tra i documenti della biblioteca di Parigi, e, nello

specifico, in una sezione di una non meglio precisata cupola [fig. 68], che riporta sul retro del foglio le seguenti iscrizioni: «Portate dal P. Bonici per il collegio di Palermo» e «stavano col disegno di Palermo ma il P. Bonici dice che non appartengono»³⁰⁰. Ancora una volta appare il nome di Bernardino Bonici (1583-1660) che certamente ha avuto un ruolo attivo nelle vicende del cantiere gesuita di Palermo³⁰¹ e la cui presenza a Roma è documentata da Emanuela Aguilera proprio nel 1655³⁰²; questa

concomitanza cronologica tra il viaggio di Padre Bonnici a Roma, compiuto nel 1655, (...) e il crollo della cupola della chiesa del Gesù di Palermo a Casa Professa (...), farebbe pensare che possa trattarsi di uno studio approntato per la ricostruzione della stessa.³⁰³

Riguardo alla paternità del disegno, in attesa di una decisiva prova documentaria e pur con le dovute cautele, la letteratura concorda nell'individuare l'autore in Buonamici³⁰⁴, anche grazie alla concomitanza cronologica delle vicende. D'altra parte, si è già detto che la solida formazione ingegneristica fornisce all'architetto quella necessaria disinvoltura nell'elaborare eleganti soluzioni – inedite o frutto di rielaborazione di temi ereditati dal passato – che si basano su principi statici ormai consolidati e osservabili anche nelle svettanti torri cittadine; chiari esempi di tale sperimentazione sono, oltre ai torrioni angolari di Palermo, i delfini proposti per contraffortare la cupola di Piazza Armerina³⁰⁵ o quelli «da farse allo Dammuso della Chiesa»³⁰⁶ gesuitica di Trapani. Per tali ragioni appare più che plausibile l'ipotesi



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figura 68; Francesco Buonamici (?), sezione di una cupola. Il disegno è riconducibile alle vicende costruttive della cupola di Casa Professa.

dell'attribuzione della cupola su torrini angolari all'architetto Francesco Buonamici, che in quegli anni è già uno dei principali interlocutori dell'Ordine in materia di architettura religiosa.

Riguardo la nuova cupola del Gesù e la sua configurazione contraffortata si rimanda ai ragionamenti di Ciro D'Arpa³⁰⁷, che, attraverso l'esame di altre fonti documentarie e iconografiche, ipotizza l'esistenza di scale a chiocciola nei torrini angolari per l'accesso alla cupola; in un documento del 1669 si registrano infatti riparazioni alla scala della cupola, probabilmente quella costruita in uno dei torrini, e alle relative porte che ne chiudono gli accessi³⁰⁸; d'altra parte, ulteriore conferma si avrebbe da un disegno acquerellato del 1685³⁰⁹ [fig. 69], che mostra lo spartito murario interno del tamburo; tale composizione è ritmata da nicchie e finestre che si alternano negli spazi scanditi dalle paraste, secondo l'illustre modello del Gesù di Roma;

Nella chiesa romana però le nicchie (...) sono disposte in corrispondenza degli assi maggiori dell'impianto contribuendo a rafforzare sul tamburo i valori visivi e simbolici dell'impianto iconografico a croce. Nel caso palermitano invece le nicchie subiscono una traslazione [una rotazione] sulle diagonali dove, evidentemente, non si potevano aprire le finestre per la presenza dei quattro torricini esterni.³¹⁰

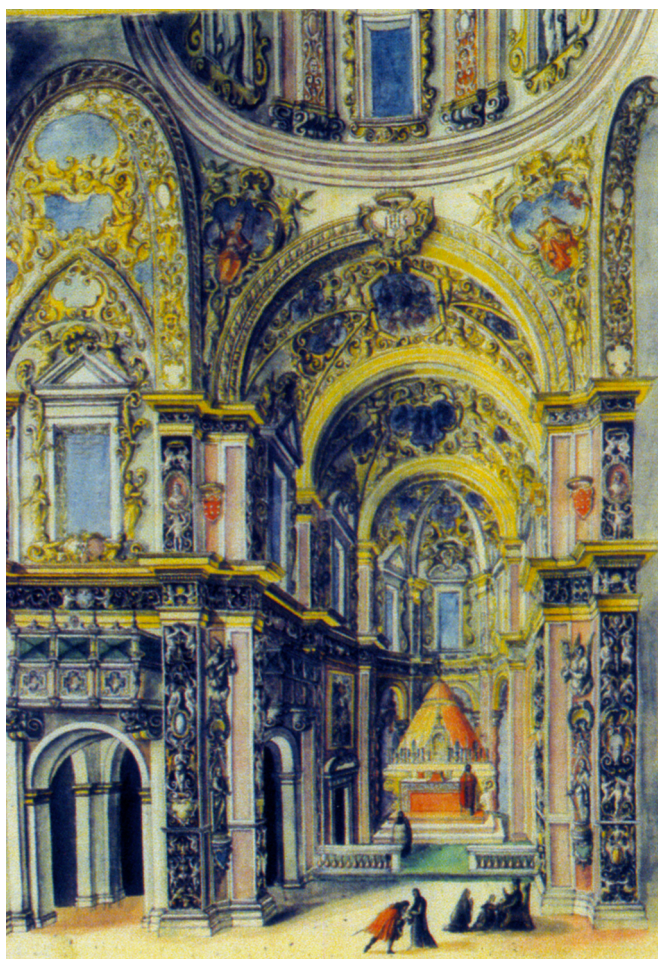


Figura 69; Carlos Castilla, *Teatro geografico antiguo y moderno del Reyno de Sicilia*, prospettiva dell'interno del Gesù.

Da quanto finora esposto, il regesto storico della cupola del Gesù potrebbe essere così sintetizzato:

- 1564 – avviata la costruzione della chiesa del Gesù su progetto del gesuita Giovanni Tristano;
- 1572-1573 ca. – viene completata la prima cupola, la cui configurazione con tamburo ottagonale è ispirata ai primi progetti del Gesù di Roma; sin da subito si evidenziano i primi problemi statici;
- 1575 – il padre Visitatore Polanco richiede l'invio sull'isola di Tristano. Il padre Mercuriano suggerisce di avvalersi di tecnici esterni all'ordine;
- 1603 – il fratello Natale Masuccio redige un progetto per l'ampliamento della chiesa che prevede la realizzazione di cappelle laterali, un nuovo transetto con terminazioni concave e il prolungamento di coro e abside;
- 1603-1610 ca. – si ipotizza il primo crollo della cupola, forse dovuto al progetto di ampliamento di Natale Masuccio;

- 1634-1635 – si costruisce una nuova cupola su progetto del fratello Giuseppe Coculla, prendendo a modello la cupola della cappella Sistina in Santa Maria Maggiore a Roma;
- 1646 – durante le fasi costruttive vengono coinvolti architetti esterni all'ordine, tra cui Agazio Stoia da Napoli; i progetti sono inviati spesso a Roma per il vaglio;
- 1646-1653 – in una data imprecisata crolla la seconda cupola;
- giugno 1654 - gennaio 1655 – si avvia la costruzione di una nuova cupola; dirige la ricostruzione il padre Bernardino Lanfranchi; alla redazione del nuovo progetto contribuiscono architetti esterni all'ordine, tra cui Francesco Buonamici;
- ottobre 1654 – si commissiona al mastro Onofrio Cosentino la realizzazione di un rivestimento maiolicato per l'estradosso della cupola, che farebbe presumere l'esistenza dei torrini già a questa data;
- 25 gennaio 1655 – crollo della terza cupola a lavori appena conclusi; si ipotizza che il crollo abbia interessato la sola parte sommitale della cupola, risparmiando il tamburo;
- aprile 1655 – è avviata la ricostruzione sotto la direzione del fratello Paolo Parisi; dalla corrispondenza si evince un coinvolgimento diretto di architetti *peritissimi*.
- 1658³¹¹ – a questa data la cupola viene completata, nonostante si registrino lavori sulla copertura (prevalentemente opere di manutenzione) fino agli anni Ottanta³¹².

La cupola del Gesù nella sua nuova formulazione dotata di torrini angolari resiste al tempo e alle calamità naturali, come nel caso dei due eventi sismici che nella prima metà del Settecento³¹³ colpiscono la città di Palermo; nel 1943, infine, la chiesa viene fortemente danneggiata e la cupola distrutta dai bombardamenti delle forze Alleate.

4.4.2 La cupola della chiesa di Sant'Angelo Martire a Licata

Il modello della cupola su torrini angolari è riproposto nella chiesa di Sant'Angelo a Licata dall'architetto Angelo Italia (1628-1700), il cui intervento nel cantiere trova riscontri documentari in due momenti distinti: un documento del 1658 fa riferimento all'esistenza di tre disegni per la fabbrica a firma di Italia; un rendiconto relativo all'amministrazione economica della fabbrica tra il 1693 e il 1701 riporta un pagamento in suo favore (datato novembre 1693), presumibilmente per il progetto della cupola. Tale progetto si inserisce in un più ampio incarico affidato all'architetto a seguito del terribile sisma che colpisce il Val di Noto e che provoca ingenti danni alla fabbrica.

La chiesa di Sant'Angelo Martire ha una pianta a croce latina con corpo basilicale a tre navate da cinque campate ciascuna, transetto e ampio coro; le navate sono separate da colonne in marmo di Billiemi sulle quali si impostano archi a tutto sesto; la navata centrale è coperta da una volta a botte lunettata impostata su un alto sovrassesto, quest'ultimo delimitato da una seconda cornice continua [fig. 70]. Le navate laterali sono coperte da volte a crociera ritmate da archi a tutto sesto trasversali; ai lati di tali campate si aprono altrettante nicchie poco profonde sulle quali sono collocate gli altari. La facciata, che rimane incompiuta nell'ordine superiore, presenta un ordine inferiore caratterizzato da un telaio di colonne libere poggianti su alti plinti e disposte su piani sfalsati, che separano l'ingresso principale dai due laterali, determinando un'estroflessione



Figura 70; Licata (AG), Chiesa di Sant'Angelo Martire, vista della navata centrale dal presbiterio; la fotografia è stata scattata con un obiettivo grandangolare a focale fissa.



Figura 71; Licata (AG), Chiesa di Sant'Angelo Martire, vista della facciata.

della porzione centrale [fig. 71]; il portale della navata centrale è incorniciato da un sistema di colonne e timpano. La cupola si imposta su un alto zoccolo quadrato, denunciato all'esterno dall'estroflessione delle pareti della crociera, che si prolungano e raccordano alle più basse pareti della navata e del transetto formando speroni di forma trapezia sagomati a scala [fig. 72]. I lati principali del tamburo ottagonale sono caratterizzati esternamente da un motivo a fasce verticali ottenuto ad intaglio e sono dotati di finestre dal profilo rettangolare e con coronamenti finemente decorati; l'interno del tamburo è invece circolare, ritmato da paraste di ordine ionico [fig. 73]; il tamburo è coronato esternamente da un'ampia cornice non denunciata all'interno, sostenuta da mensole in forma di dentelli e avente la funzione di ballatoio per l'accesso alla calotta; alla cornice si accede dalle due scale contenute nei torrini angolari [fig. 74]; la calotta, che si imposta su un sovrassesto in pietra ed è affiancata dai coronamenti dei torrini, è marcata esternamente da fasce in rilievo che convergono verso la lanterna.



Figura 72; ; Licata (AG), Chiesa di Sant'Angelo Martire, vista dell'estradosso della cupola; si noti l'estroflessione dello zoccolo di base e gli speroni a scala che contraffortano le masse murarie raccordandosi alle murature sottostanti.



Figura 73; ; Licata (AG), Chiesa di Sant'Angelo Martire, (a sinistra) vista dell'intradosso della cupola su pennacchi; (a destra) vista del tamburo da uno dei varchi di accesso alla calotta.

La fabbrica sorge su un più antico edificio religioso dedicato ai Santi Apostoli Filippo e Giacomo, allora patroni di Licata; secondo le cronache dell'epoca, la volontà di costruire una nuova chiesa nasce come segno di gratitudine al Santo martire Angelo da Gerusalemme, che aveva guarito la città dalla peste del 1625.

Apprendiamo alcune delle vicende costruttive della nuova chiesa carmelitana da un manoscritto custodito presso la Biblioteca Comunale di Licata³¹⁴ redatto da uno dei deputati della fabbrica in carica dal 1652 al 1657. Dal testo si evince che negli anni Sessanta del XVI secolo, alla chiesetta medievale con impianto ad aula³¹⁵, viene aggiunta un'ala settentrionale dedicata al culto del Santo. Tale configurazione rimane invariata sino all'uno gennaio 1626, data in cui è registrata la posa della prima pietra nella nuova fabbrica³¹⁶; i lavori procedono lentamente fino al 1652 e tale ritardo, presumibilmente dovuto ad una scarsa organizzazione del cantiere, è confermato dalla stipula dei contratti per le forniture di materiali edili avvenuta solo nel 1639³¹⁷. Una *lista della roba della fabbrica* risalente al 1658, consente a Ciro D'Arpa di chiarire ulteriori questioni sul cantiere³¹⁸; il documento restituisce il dettaglio delle obbligazioni per la fornitura delle colonne in marmo di Billiemi, stipulate dal 1640 in poi: il marmo è lavorato direttamente a Palermo e trasportato via mare in più fasi; la produzione delle nuove colonne si protrae durante i dieci anni che seguono³¹⁹ e nel 1653, quando arrivano finalmente a Licata, i lavori nella chiesa riprendono³²⁰.

La direzione del cantiere è affidata al capomastro licatese Angelo Bennici, che traccia la pianta e dispone i sostegni secondo il progetto risalente al 1626, documentato indirettamente da fonti successive³²¹. Nel 1656, forse per l'obsolescenza del progetto o per la necessità di un conforto tecnico, il capomastro richiede una perizia sulla fabbrica³²² al messinese Nicola Messineo, che «di certo doveva rappresentare in quegli anni e in quei luoghi un'autorità in materia di architettura»³²³. La perizia ripercorre i principali temi della costruzione, affrontando il dimensionamento della cupola e dei suoi pilastri, l'altezza della navata centrale e le dimensioni degli archi che separano le navate; riguardo la cupola, le valutazioni di Messineo sono prettamente legate alla stabilità del manufatto e del terreno di fondazione e prevedono la realizzazione di una calotta a padiglione su sovrassesto poggiante sul tamburo ottagonale e avente profilo *a menzo arancio*; inoltre Messineo prescrive l'uso di catene lignee, da annegare nella muratura probabilmente per migliorare la risposta elastica della fabbrica.

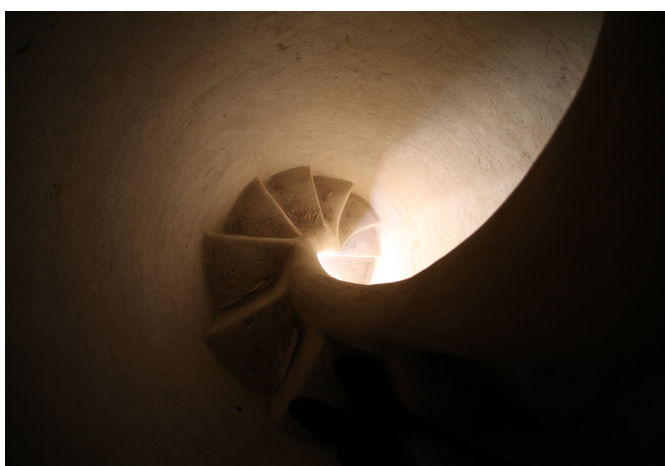


Figura 74; Licata (AG), Chiesa di Sant'Angelo Martire, scala a chiocciola all'interno di uno dei torrini; da tale scala si accede alla calotta.

La perizia, che prosegue affrontando gli altri nodi problematici del cantiere, è infine avallata dal parere favorevole di numerose autorità del tempo in tema di architettura, tra cui figura «Francisco Bonamici Inghignero di Malta»³²⁴. Anche se non conosciamo quale sia stato il reale contributo di Buonamici nel Sant'Angelo di Licata³²⁵, la documentata presenza dell'architetto lucchese potrebbe condurre ad affascinanti suggestioni sulla paternità di alcune soluzioni, specie considerando le relazioni che in quel momento Buonamici instaura con le alte sfere religiose della diocesi di Siracusa (di cui fa parte anche Licata)³²⁶.

Nel 1658 viene redatto un nuovo progetto della fabbrica – probabilmente un aggiornamento del precedente sulla scorta della perizia prodotta – che consta di tre disegni «fatti per mastro Angelo di Italia (...) et sono cioè la pianta della chiesa, il profilo di fuori della chiesa et il profilo di dentro della chiesa»³²⁷; da queste notizie si apprende che la stesura del nuovo progetto avviene per mano del trentenne Angelo Italia, ancora annoverato in questa fase con il ruolo di capomastro, proprio mentre sulla questione venivano coinvolti i più autorevoli architetti e ingegneri dell'epoca. La partecipazione di Angelo Italia in questa prima fase dei lavori sembrerebbe comunque limitarsi alla produzione dei nuovi elaborati di progetto poiché nei documenti successivi il ruolo di capomastro della fabbrica è assunto da Andrea Noara da Trapani³²⁸. Dopo il 1656 i lavori procedono più rapidamente, evidentemente grazie alla già citata perizia e ai nuovi progetti; pertanto, nel 1657 sono già ultimate quattro cappelle con i relativi altari³²⁹ e, come riporta il deputato autore del manoscritto, nel 1662 la chiesa è aperta al culto³³⁰; naturalmente a questa data ben poco è già completato e nei due anni successivi si lavora ancora alle coperture, alle finiture della fabbrica e alla costruzione della volta della navata³³¹; il cantiere rimane attivo certamente fino al maggio del 1680, quando viene documentato il completamento dei lavori³³²; certo è che, a quella data, la chiesa è ancora sprovvista di cupola³³³.

Prima di poter affrontare le vicende costruttive riguardanti la cupola, che peraltro non sarà realizzata prima del terremoto del 1693, si rende necessario un breve cenno alla figura professionale di Angelo Italia³³⁴, e, in particolare, alle vicende legate alla prima formazione dell'architetto, che rimangono in gran parte prive di riscontri documentari, ma che potrebbero agevolmente spiegare le scelte adottate nel progetto della cupola.

Una recente ipotesi attributiva di Domenico Sutura, riguardante un possibile coinvolgimento di Buonamici per la chiesa madre di Mazzarino³³⁵, potrebbe ricostruire alcuni momenti della formazione di Angelo Italia, che, secondo Marco Nobile, proprio in quella sede avrebbe potuto incontrare Francesco Buonamici³³⁶. In questo caso, l'affiancamento ai più noti professionisti dell'epoca come Buonamici e la frequentazione dei circoli intellettuali più in vista, spiegherebbero la formazione culturale di Italia, acquisita, almeno in un primo tempo, senza l'affiliazione agli ordini religiosi. Inoltre, è plausibile che il contatto con il principale architetto della Compagnia di quel periodo abbia potuto suscitare nel giovane capomastro la volontà di un'emancipazione professionale, raggiungibile solo con l'ingresso nell'ordine gesuita.

Come la letteratura ha già chiarito, altri stimoli potrebbero provenire anche dalle prime attività di maestro intagliatore e capomastro: qualche anno prima di prendere i voti, nel 1666, troviamo Italia a Palma di Montechiaro, dedito alla stesura di una proposta per la chiesa madre³³⁷ su incarico del duca Tomasi di Lampedusa; anche in questo caso, il ruolo di mentore che avrebbe potuto ricoprire la prestigiosa committenza³³⁸, costituirebbe un altro decisivo tassello nella formazione dell'architetto.

Entrato nell'ordine come fratello nel 1671³³⁹, Italia è destinato ad assumere l'importante ruolo di architetto ufficiale della Compagnia che, dalla morte di Tommaso Blandino (1629), nessun altro sembrava aver ereditato³⁴⁰. Questo ruolo gli vale l'affidamento dei più prestigiosi cantieri dell'isola, e pertanto, nel 1672 si trova a Messina per la chiesa di San Francesco Saverio, dal 1673 lavora al Collegio di Mazara³⁴¹, nel 1679 è a Palermo per la scala del Collegio Massimo³⁴², tra il 1681 e il '91 svolge la sua attività tra Mazzarino (per il cantiere della chiesa madre)³⁴³ e Polizzi Generosa (dal 1683)³⁴⁴, e dall'anno successivo progetta e dirige i lavori del San Francesco Saverio a Palermo annesso alla Casa di Terza Probatione³⁴⁵, cantiere che lo impegnerà fino alla sua morte, avvenuta nel 1700.

Da questa mole di esperienze, non stupisce che, dopo il terremoto che colpisce il Val di Noto nel 1693, l'ormai affermato architetto venga coinvolto nel processo di ricostruzione urbana di Avola, Noto e Lentini³⁴⁶.

e nella ricostruzione della chiesa di Catania. È in questo momento che Italia viene richiamato a Licata, nel principale cantiere della città natale, per la valutazione dei danni provocati dal sisma e per la stima degli interventi di riparazione. Secondo le fonti documentarie, infatti, la chiesa di Sant'Angelo «fu la più danneggiata»³⁴⁷ e l'avvio della riparazione della fabbrica sotto la direzione del più importante architetto gesuita del tempo, costituiva un'ottima occasione per avviare anche la costruzione della cupola. L'attribuzione del progetto all'architetto gesuita è confermata da un dettagliato rendiconto dei lavori riguardante gli anni 1693-1701³⁴⁸, che proprio nel novembre 1693 registra un pagamento in favore di Italia e un pagamento all'ebanista Paolo Salemi per un modello ligneo. La realizzazione del modello costituisce una chiara necessità di prefigurazione della soluzione ideata da Italia, che, come detto in precedenza, consente una rapida valutazione del progetto della cupola anche sotto il profilo tecnologico e funge da strumento di verifica dell'avanzamento lavori.

Negli anni successivi il cantiere è sotto la direzione del capomastro Mario Callisto, collaboratore di Italia in numerosi cantieri palermitani, ma già nel 1695-1696 è richiesta nuovamente la presenza dell'architetto a Licata; tale necessità è testimoniata da una lettera che il padre Generale dell'ordine scrive ai giurati della città (6 febbraio 1696) in risposta a una loro precedente richiesta:

Ho raccomandato a codesto mio P. Provinciale che per qualche settimana conceda loro il Frat. Angelo Italia, il quale possa dare indirizzo aggiustato alla fabbrica di codesta cupola nella chiesa di San Angelo.³⁴⁹

Gli indizi lasciati dalla corrispondenza non consentono di risalire a eventuali difficoltà costruttive che in questa fase abbiano richiesto la presenza dell'autorevole maestro; tuttavia sembrerebbe che l'architetto abbia già trascorso a Licata i precedenti sei mesi³⁵⁰ nel tentativo di *dare indirizzo aggiustato* a non meglio specificati problemi della cupola, e che si ritenga necessario prolungare la permanenza.

Ulteriori indicazioni potrebbe fornirci il già citato resoconto, da cui si evince che i lavori sono stati compiuti in due fasi distinte: la prima fase, da maggio a novembre 1696, corrispondente all'avvio dei lavori; la seconda fase, da giugno a novembre 1700, in cui la cupola sarebbe stata completata³⁵¹. La concomitanza temporale tra la presenza di Italia in cantiere e la prima fase dei lavori potrebbe suggerire la necessità di individuare una soluzione ad antichi problemi ben noti all'architetto³⁵², peraltro in un cantiere già ampiamente avviato e profondamente destabilizzato dal sisma. Secondo tali considerazioni, appare evidente che la lezione appresa a Palermo e sperimentata già nella cupola del Carmine con esiti formalmente più ricercati, abbia trovato la sua formulazione compiuta in una Licata appena colpita dal sisma.

4.4.3 La cupola della cattedrale di San Lorenzo a Trapani

La cattedrale di San Lorenzo a Trapani è una chiesa basilicale a tre navate e cappelle laterali, transetto e profondo coro absidato; la navata centrale è coperta da una volta a botte su sovrassesto e separata dalle navi laterali attraverso due file di archi su colonne [fig. 75]; la navata è illuminata da finestre che, nella parte superiore, intercettano direttamente la volta a botte, rendendo minimo il taglio delle lunette. Volte a botte coprono anche l'area del transetto e del coro, mentre il catino è concluso da una calotta sferica. Le navate laterali sono coperte da volte a crociera dalla terminazione piatta, assimilabili a piccole volte a padiglione. Ai lati delle navate minori si aprono nicchie sostenute da pilastri e archi a tutto sesto. La facciata della chiesa [fig. 76], frutto di stratificazioni successive, presenta nell'ordine inferiore un portico a tre arcate, che si innesta nella seicentesca facciata determinando un avanzamento del corpo di fabbrica sino al ciglio stradale; il secondo ordine, arretrato rispetto al portico, è contraddistinto da un profilo planimetrico sinuoso, cinto ai lati da due massicci corpi di fabbrica; su uno di questi si imposta un campanile dall'elegante e variopinta terminazione.



Figura 75; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, volta a botte che copre la navata centrale.



Figura 76; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, facciata.

La cupola si imposta sui quattro pennacchi della crociera [fig. 77], che all'esterno delineano uno zoccolo solo parzialmente estroflesso dal resto delle coperture della fabbrica; il profilo esterno del tamburo è marcato inferiormente da uno zoccolo che sostiene la parte superiore nella parte terminale da un sistema di cornici con aggetti distinti [fig. 78]; l'area della crociera è illuminata grazie alla presenza di finestre rettangolari sui lati principali dell'ottagono; finestre con terminazioni lobate illuminano anche l'interno dei torrini, dove sono collocate le scale per l'accesso alla calotta. Quest'ultima, che è percorsa dalle consuete fasce a sesto acuto convergenti verso la lanterna, è finemente decorata da un motivo policromo riproposto anche negli elaborati coronamenti dei torrini e nel campanile.

La costruzione della cupola, avvenuta nella terza decade del Settecento su progetto di Giovanni Biagio Amico, è parte di una più ampia vicenda costruttiva che vede l'architetto trapanese al centro di una nuova campagna di rinnovamento della fabbrica (la terza dalla sua fondazione) e che culminerà nella costruzione della tanto discussa facciata.

Da una fonte cinquecentesca³⁵³ apprendiamo dell'esistenza, già dal XII secolo, di un'antica chiesa nel luogo in cui si trova l'attuale cattedrale³⁵⁴; tale fabbrica, che sorgeva in prossimità della loggia dei genovesi, è eletta chiesa parrocchiale nel 1421 per volere di Alfonso il Magnanimo³⁵⁵ e viene ampliata nel 1425³⁵⁶. È presumibile che questa prima campagna di lavori sia stata completata in pochi anni, se già nel 1431 il parrochiano Francesco Ventu assegnava alla chiesa un censo annuo di 15 tari, per assicurarsi la sepoltura nel monumento funerario di famiglia presente nella chiesa³⁵⁷.

Nel XVII secolo la fabbrica è sottoposta a un nuovo ampliamento, che doveva essere già nelle intenzioni dai primi anni del Seicento³⁵⁸; sembra comunque che i lavori siano entrati nel vivo solo nel 1639, sulla base di un progetto redatto qualche anno prima (1635)³⁵⁹ dall'architetto messinese Bonaventura Certo (1586-1650)³⁶⁰ dei minori conventuali; il progetto del padre francescano prevede la realizzazione di una chiesa colonnare a tre navate, frutto di una sperimentazione isolana già avviata nella chiesa dei Gesuiti di Trapani (1613) e nella chiesa madre di Salemi (1619)³⁶¹.

Nei due anni successivi all'apertura del cantiere, i lavori interessano prevalentemente la navata sinistra e il corpo basilicale, come proverebbero alcuni atti notarili citati da Mario Serraino e risalenti al biennio 1639-1640. Un primo documento registra le condizioni per l'annessione della cappella di San Giorgio alla nuova chiesa di San Lorenzo: il documento prescrive infatti che la nuova cappella (la seconda della navata sinistra)



Figura 77; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, intradosso della cupola.



Figura 78; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, estradosso della cupola.

venga dedicata al Santo patrono dei genovesi e che tutte le altre cappelle si facciano su modello di quest'ultima. Da altri due documenti si evince che nel 1639 il maestro Leonardo Santoro realizza la terza cappella della navata sinistra e l'anno successivo vengono erette le colonne monolitiche della navata centrale dal maestro Matteo Artale³⁶². Da questi riscontri documentari sembra plausibile l'ipotesi di Mario Serraino che propone un prematuro avvio dei lavori nell'abside (1603), vista la necessità di aprire quanto prima la chiesa al culto; d'altro canto, in attesa di una definitiva conferma documentaria, non si può nemmeno escludere un insolito inizio delle opere a partire dal corpo basilicale anziché dal presbiterio, come era già avvenuto, peraltro, nel Gesù di Palermo³⁶³.

Nel XVIII secolo una nuova campagna di ammodernamento è avviata da Giovanni Biagio Amico³⁶⁴, tornato a Trapani nel 1730 dopo un'intensa attività professionale svolta nella capitale e in alcuni centri minori. Amico, che nel primo periodo della sua carriera si afferma come progettista di apparati effimeri nei più prestigiosi circoli della provincia di Trapani³⁶⁵, avvia la sua attività di architetto già all'età di ventiquattro anni³⁶⁶, un anno prima di essere ordinato sacerdote dal vescovo di Mazara (1709). Pochi anni dopo è già Governatore della Congregazione del Purgatorio di Trapani (1711-1725)³⁶⁷, e avvia i lavori per la costruzione della facciata nella relativa chiesa (1712-1714)³⁶⁸. Dal 1714 al 1723 Amico si sposta tra Marsala, Trapani, Calatafimi e Alcamo, coordinando i numerosi incarichi ricevuti dalla Compagnia di Gesù e da alcuni ordini monastici femminili³⁶⁹. Nel 1725, un anno prima della pubblicazione dell'*Architetto Prattico*³⁷⁰, Amico riceve due prestigiose cariche istituzionali, che dimostrano l'autorità acquisita in materia di architettura civile e religiosa: è del novembre di quell'anno la nomina a secondo architetto del Senato di Trapani, carica che gli consente di affiancare Giacomo Di Stefano, primo Architetto del Senato, e di sostituirlo nel «*predictus officium Ingegneris exercere in casu absentie, infirmitatis, vel alterius impedimenti*»³⁷¹; da una minuta di alcuni anni dopo³⁷² apprendiamo che dal 1725 è anche Ingegnere del Tribunale del Real Patrimonio per tutta l'isola, carica che manterrà sino alla morte. Non stupisce quindi che, subito dopo il terremoto che colpisce la capitale nel 1726, Amico sia coinvolto nella ricostruzione di numerose fabbriche, utile banco di prova per la sperimentazione di nuove tecniche di consolidamento statico:

Nel 1726 [Giovanni Amico] diede riparo in Palermo a molte fabbriche danneggiate dal terremoto, senza atterrarle, come da molti si pretendeva, ed introdusse quella sorprendente maniera di ristorare le fabbriche nelle fondamenta, con sostenerne per via di puntelli il rimanente, lasciandolo quasi appeso nell'aria, la prima volta prodotta nel 1693 da Sebastiano Nicolosi da Bisacquino.³⁷³

Questa testimonianza denota le indiscusse conoscenze che l'architetto del Real Patrimonio ha già acquisito in tema di statica degli edifici, conoscenze che gli permettono, peraltro, di rielaborare nuovi espedienti costruttivi per il consolidamento e per la prevenzione del rischio sismico, come, ad esempio, le già citate catene in pietra³⁷⁴.

Negli anni immediatamente successivi al sisma, Amico si occupa della ricostruzione del campanile della cattedrale³⁷⁵, mentre sono attivi i cantieri palermitani di Sant'Anna della Misericordia³⁷⁶ e di San Domenico³⁷⁷, per i quali progetta il completamento delle facciate. La vicenda del San Domenico offre anche l'occasione di succedere al defunto collega domenicano Tomaso Maria Napoli nel progetto della colonna dell'Immacolata e nella risistemazione della piazza imperiale.

Nel 1730 Amico si allontana da Palermo³⁷⁸, lasciando i cantieri della capitale in piena attività; le ragioni di questo trasferimento vanno ricercate negli instabili equilibri politici di quegli anni³⁷⁹ e, forse molto più significativamente, nella sopravvenuta mancanza di quella necessaria tutela istituzionale, di cui godeva fino a qualche tempo prima³⁸⁰; come è noto, Amico continuerà a seguire a distanza alcuni cantieri di Palermo³⁸¹, peraltro coordinando maestranze trapanesi di sua fiducia, ma è proprio a Trapani che l'architetto riceve nuove gratifiche professionali, come la riconferma del titolo di Architetto del Senato (1730)³⁸² che gli vale l'incarico di revisionare le dotazioni difensive dell'isola³⁸³, l'elezione a Vicario foraneo e Visitatore dei monasteri (1731)³⁸⁴, e infine la nomina di parroco della chiesa di San Lorenzo (1732)³⁸⁵, fabbrica che, come detto, sottoporà presto a un ampio ciclo di riforme.

Per valutare il contributo di Amico nel San Lorenzo, è necessario tenere conto di un arco temporale di circa quindici anni e di un cantiere che procede in maniera frammentaria e apparentemente episodica, forse anche a causa delle ristrette disponibilità economiche; un rapido sguardo alla cronologia della fabbrica restituisce una serie di interventi isolati: dal 1730 sono realizzate le cappelle ai lati del *Cappellone*, dedicate al Santissimo Sacramento e alla Vergine Maria³⁸⁶; dal 1734 si avvia la costruzione della cupola; nel 1736 si lavora nel campanile; nel 1748 si realizza la facciata.

Nonostante un periodo di attività così esteso, si può immaginare che Amico abbia concepito un programma complessivo di riforme, magari attuato in più fasi e costellato di difficoltà e opposizioni³⁸⁷? In assenza di una risolutiva documentazione, si può solo supporre in quale clima di tensione si trovi il cantiere di San Lorenzo; un indizio che potrebbe suggerire momenti di aperta contrapposizione fra Amico e il clero si deduce da un testamento di Amico risalente al 1742, redatto quando la cupola è già conclusa e rimane ancora aperta la questione della facciata; l'architetto, che in questa occasione dispensa la tesoreria della fabbrica dal pagare il credito dovuto per le sue prestazioni, afferma che avrebbe ritirato tale concessione se fosse stato accusato di aver indebitato la chiesa senza la giusta motivazione. Probabilmente tale accusa doveva già circolare, seppur in maniera velata, negli ambienti del clero; d'altra parte, è presumibile che il duplice ruolo di committente e architetto che Amico assume per il cantiere di San Lorenzo abbia potuto suscitare non poche critiche.

Tornando alle vicende costruttive, un documento datato 1 marzo 1734 registra l'impegno del capomastro Felice Pisano nel

fabbricare da dimane innanzi la Cupola di detta Venerabile Parrocchiale Chiesa, quale deve essere delle misure che gli darà detto Amico, e della simmetria del modello in legno che esiste in detta Chiesa, l'ornamenti della quale devono essere intagliati tanto nella parte di dentro, quanto nella parte di fuori, non dovendo detto mastro eseguire verun ornamento di gesso, ma solamente la deve stucchiare sopra i cantoni intagliati, (...) dovendo mettere quelli mattoni stagnati sopra la detta Cupola e Cupoline, e di più fare in una delle quattro Cupoline, una scala a lumaca della forma che

la vorrà detto d'Amico, con metterci tutti quelli ferrati saranno necessari in detta Cupola, e finalmente fare tutte le opere attinenti a mastro di muro per la totale perfezione della detta Cupola e Cupoline benviste ad detto d'Amico e secondi il disegno, quale fabbrica detto di Pisano ha promesso e promette (...) dare cosa finita bona e magistralmente fatta fra il termine d'anni tre compresi da oggi innanzi (...).³⁸⁸

La descrizione del tamburo contraffortato coperto da cupola e cupolini evoca chiaramente un sistema a quinconce, mentre gli aspetti costruttivi sono pienamente definiti prescrivendo l'impiego di pietra da taglio anche per *l'ornamenti*; il cenno alla scala *a lumaca* da realizzare in uno dei torrini lascia intendere che il plastico ne sia sprovvisto, dato il rimando ad una successiva definizione formale secondo le prescrizioni dell'architetto.

Come già accennato, la costruzione del modello ligneo costituisce una prassi ormai consolidata per almeno due ragioni: in primo luogo il plastico rappresenta un valido strumento di definizione e controllo del progetto, sia per la stipula del contratto d'appalto, sia per la cantierizzazione dell'opera. Inoltre, è plausibile che questo espediente sia servito a promuovere l'insolita soluzione contraffortata negli ambienti ecclesiastici e tra gli intendenti di architettura; l'evidente rimando all'illustre esempio della capitale, che doveva essere ben noto agli intellettuali coinvolti nel cantiere, avrà certamente contribuito a ottenere un rapido consenso; inoltre sembra plausibile che lo stesso Amico, attratto dalle valenze estetiche dell'esempio palermitano³⁸⁹, e dopo averne osservato le doti statiche in occasione del terremoto del 1726, abbia voluto proporre una personale rielaborazione del modello.

I lavori nella cupola sembrano procedere rapidamente e senza grandi difficoltà, tanto da poter ritenere l'opera conclusa già nel 1736, un anno prima della scadenza prevista dal contratto. Questa ipotesi è confortata da un nuovo appalto che il capomastro Felice Pisano stipula per la realizzazione di un campanile in facciata³⁹⁰; a quella data, la seicentesca fronte del San Lorenzo³⁹¹ doveva risultare ancora incompiuta e tale condizione avrebbe potuto suggerire la necessità di una completa riconfigurazione; secondo una ricostruzione proposta da Marco Nobile, il nuovo progetto prevede un profilo planimetrico sinuoso del tutto simile a quello oggi visibile nel secondo ordine e cinto ai lati dalle possenti masse murarie dei due campanili; in alzato Amico propone una terminazione retta nelle navate laterali che raggiunge la stessa quota della nave centrale, secondo un modello già sperimentato nel San Domenico a Palermo e che doveva ritrovare illustri riferimenti nella celebre Kollegienkirche di Salisburgo³⁹² [fig. 79]. Questa soluzione, tuttavia, non viene interamente realizzata, forse a causa delle ristrettezze economiche e di alcuni problemi strutturali dovuti alle preesistenze; da questo momento, infatti, le vicende costruttive nel cantiere sembrano complicarsi ulteriormente, tanto da giungere alla realizzazione della nuova facciata solo dodici anni più tardi³⁹³, nel 1748, peraltro con una soluzione del tutto differente, che prevede l'innesto dell'attuale portico nella facciata seicentesca.

Anche in questo caso è documentata la costruzione di un modello, realizzato da Giovanni Pisano, che riproduce uno dei pilastri del portico³⁹⁴; il modello, che è costruito in scala 1:1, ha ancora una volta lo scopo di promuovere l'intervento, specie a seguito del clima apertamente critico che doveva essersi instaurato nel cantiere; solo questo aspetto, tuttavia, non sembra poter giustificare la necessità di un plastico tanto grande e costoso; molto più probabilmente l'esigenza è quella di prefigurare in tre dimensioni l'elaborato congegno costruttivo ideato da Amico e precisare il complesso intaglio dei conci curvilinei³⁹⁵.

La cupola della cattedrale di Trapani conclude la parabola delle sperimentazioni isolate sul tema; nel 1750, Amico pubblica a Palermo il secondo volume del suo trattato, nel quale inserisce un elenco delle opere da lui realizzate; nel caso del San Lorenzo così scrive:

Cupola della Chiesa Parrocchiale, ed Insigne Collegiata di San Lorenzo, Cappelle, Organo, ed altri ornati nella medesima. Facciata, o Portico, e Campanile della medesima.³⁹⁶



Figura 79; J. B. Fischer von Erlach, Kollegienkirche a Salisburgo, incisione, 1721.

Da quanto sinora emerso è evidente che il modello palermitano abbia assunto un ruolo preminente anche nella definizione del progetto per Trapani, viste le numerose occasioni di lavoro che Amico ha avuto nella capitale; non sembra improbabile che l'architetto trapanese sia venuto a conoscenza (e abbia contribuito) allo sviluppo di vere e proprie teorie sull'efficacia antisismica dei torrini angolari, o ancora, che abbia potuto consultare i carteggi relativi alla complessa fabbrica del Gesù, grazie al suo accreditamento presso le più alte cariche della Compagnia. Un ulteriore stimolo alla sperimentazione sul tema potrebbe arrivare anche dalla chiesa di Licata, che Amico avrà certamente osservato nel periodo in cui lavora alla revisione delle difese di quella città (1730). Infine, è proprio con quest'ultima fabbrica che negli anni Cinquanta sembrano intrecciarsi le vicende professionali di Amico, che viene coinvolto probabilmente nella realizzazione della nuova facciata³⁹⁷ poi rimasta incompiuta; infatti, pur non conoscendo l'autore del progetto, certo è che in quella occasione Amico sia stato interpellato, insieme all'omonimo nipote di Angelo Italia, sulla qualità delle nuove colonne commissionate³⁹⁸.

capitolo 5 _ Rilievo e interpretazione geometrica delle cupole su torrini

«Iam in musica, in geometria, in astrorum motibus, in numerorum necessitatibus ordo ita dominatur ut si quis quasi eius fontem atque ipsum penetrare videre desideret, aut in his inveniat aut per haec eo sine ullo errore ducatur».

Nella musica poi, nella geometria, nei moti degli astri, nelle leggi aritmetiche l'armonia è sovrana, e se qualcuno ne vuol vedere, per così dire, la sorgente e il recesso o li trova in esse o, mediante esse, senza errore v'è condotto.

(S. AGOSTINO, *De Ordine*, 20,54)

5.1 La geometria come chiave di lettura per le cupole: una nota sintetica

Nel 1997 così Claudia Conforti introduceva al suo volume *Lo specchio del cielo*:

È possibile considerare l'origine di una qualsiasi forma architettonica da un punto di vista archeologico e tecnico oppure da uno logico ed estetico, o meglio, conoscitivo; in altre parole, la si può considerare come qualcosa che svolge una funzione oppure come qualcosa che esprime un significato. Ci affrettiamo ad aggiungere che queste sono distinzioni logiche, non reali: nella forma dell'opera la funzione e il significato coincidono; tuttavia ci è possibile ignorare l'uno o l'altro aspetto, utilizzandola come oggetto essenziale alla vita attiva del corpo oppure come qualcosa che predispone alla vita contemplativa dello spirito. (...) Se infatti negli ultimi cinquant'anni sono state frequenti, o meglio, non del tutto insolite, le riflessioni intorno alle valenze e alle scresziature simboliche della cupola, assai più sporadici risultano gli studi incentrati sui modi della sua costruzione, sui materiali impiegati, sugli schemi geometrici adottati (o contraddetti), sulle tecniche di cantiere. (...) La scarsa accessibilità di gran parte delle cupole, l'obiettivo difficoltà dei sopralluoghi, la frequente assenza di rilievi grafici aggiornati e attendibili, ne ha fatto delle "icone simboliche" suasive, quanto sconosciute ed enigmatiche per tutto ciò che riguarda la loro genesi e consistenza materica.³⁹⁹

Benché il binomio forma/simbolismo (e le implicazioni costruttive che ne conseguono) costituisca certamente un argomento di rilevante importanza nella trattazione di strutture a cupola, una sua anche minima trattazione esulerebbe dagli obiettivi di questo studio. Va tuttavia osservato che l'edificazione delle cupole, con il loro carico di problemi e complessità strutturali, ha trovato nel tempo una giustificazione solo in virtù della loro forte carica simbolica. La costruzione di tali manufatti ha sempre costituito un momento di fervido confronto tra tecniche, modelli ed esperienze, anche in considerazione delle energie canalizzate nella stesura dei progetti e nella fase realizzativa; non meno rilevante è il ruolo assunto da intellettuali e ordini religiosi che intervenivano nella valutazione e nel perfezionamento di soluzioni sempre più ardite: come già detto, questa nutrita attenzione per il tema sfociava ad esempio nella realizzazione di grandiosi e dettagliati modelli in scala. È naturale, quindi, che gli studi sui caratteri costruttivi e sul dimensionamento geometrico delle cupole dovessero arricchirsi nel tempo di nuovi contributi, e che, dal XV secolo, tali esperienze venissero documentate nella trattatistica.

Come insegna Vitruvio⁴⁰⁰, il progetto d'architettura ha la sua stessa origine nella definizione di un *modulus* a cui riferire interamente la fabbrica, e nella costruzione dei principi logici e geometrici che ne permettono una composizione armoniosa. Ciò a cui il rilievo deve condurre, pertanto, è l'individuazione di tali schemi compositivi che, al di là di un mero elenco di dimensioni, costituiscono l'unico modo di ricostruire il

processo progettuale attraverso la geometria e la proporzione tra le parti. A tale scopo, occorre ricordare che l'impiego di metodi algebrici per il dimensionamento degli edifici è divenuto ricorrente solo nella seconda metà del Settecento, e che, prima di allora, l'intera produzione architettonica avveniva attraverso l'applicazione di regole geometriche; già a partire dagli *Elementi* di Euclide, il termine "geometria" è usato per indicare la scienza delle figure con le loro proprietà, e il ricorso ai numeri negli studi di geometria è legato alla sola esplicitazione delle relative grandezze.

Cartesio è il primo a codificare la relazione tra figure geometriche e algebra (geometria algebrica), che sarà ampiamente sviluppata grazie ai contributi di Monge nell'ambito delle curve tridimensionali; ad ogni modo, per lungo tempo l'algebra sarà relegata alla soluzione di questioni complesse, mentre la geometria tradizionale continuerà a caratterizzare l'ambito dell'architettura.

Da Palladio a Serlio, nei testi di architettura la geometria è da sempre considerata lo strumento principe per la conoscenza dei modelli del passato e per il corretto dimensionamento delle nuove cupole; ma il ricorso sistematico a regole geometriche si intensifica nell'ultimo quarto del Seicento, con la pubblicazione dei lavori di Carlo Fontana, «nei quali vengono suggeriti rapporti dimensionali desunti dall'osservazione degli esempi costruiti, consolidati in secoli di applicazioni»⁴⁰¹. La celebre *Dichiaratione* (1673) nasce proprio come risposta motivata alle perplessità avanzate dai contemporanei per il progetto della cupola di Santa Margherita a Montefiascone⁴⁰²; una revisione di tali principi viene proposta nel *Templum Vaticanum* del 1694, a dimostrazione del fatto che gli arrotondamenti nel dimensionamento sono frutto di vicende empiriche e di espedienti soggettivi⁴⁰³.

Anche Giovanni Biagio Amico, che conosce i lavori di Fontana⁴⁰⁴, propone regole per il dimensionamento geometrico di alcune tipologie di cupole⁴⁰⁵, ponendosi in continuità con la trattatistica precedente, ma con un atteggiamento che procede, come afferma Marco Nobile, dal rilievo al "tipo", ossia dal caso concreto, frutto di osservazione e sperimentazione, al prototipo da emulare.

Quanto venne fatto confluire nelle incisioni del trattato era con tutta probabilità il bagaglio di lunghe vicende professionali, di apprendistati, di riflessioni teoriche, intuizioni e modifiche progettuali su fabbriche di prestigio.⁴⁰⁶

Dall'esame delle norme proposte da Amico emerge la chiara matrice proporzionale sottesa al dimensionamento dell'opera: un imprescindibile strumento che dalla conoscenza dell'architettura del passato, quindi dal rilievo, giunge alla definizione di un modello depurato delle contingenze del costruito. Nel secondo volume dell'*Architetto Pratico*, dopo aver enunciato «le Regole più generali, e pratiche per ben ordinare le parti principali degli Edifizi», Amico affronta i temi

della simetria, e proporzioni, che aver debbono tra loro in un determinato Edifizio quelle parti, delle quali già sappiamo qual debba essere ciascuna in se stessa, e qual proporzione esser debba ne' membri, che la compongono.⁴⁰⁷

Si tratta innanzitutto di una serie di norme generali che il formando architetto al quale è rivolta l'opera potrà utilizzare nella progettazione «de Tempj de' Cristiani»; tali principi sono rintracciabili ancora una volta nell'equilibrio insito nel corpo umano e nella relazione tra le sue parti (Vitruvio), o nell'armonia delle composizioni musicali (Alberti).

In fatti osserva il Palladio, che siccome nel corpo umano, la distanza dell'estremità del dito dello stesso, al cubito, sia uguale a quella dello stesso cubito al mento, cioè alla metà del petto, sicché da un cubito all'altro vi è il doppio della distanza del medesimo cubito all'estremità delle dita; così la Nave della Chiesa, che rappresenta la larghezza d'un cubito all'altro, deve esser doppia della larghezza dell'Ale, che rappresentano la larghezza del cubito all'estremità della mano (...).

Altri ricavano le misure d'un Tempio dalla proporzione, che tra di loro hanno le consonanze della Musica, (...) poiché se la Musica porta diletto per l'analogia, o somiglianza, che ha la proporzione

delle di lei consonanze con la proporzione delle parti del corpo umano; si vede chiaro, che conformandosi la proporzione delle parti di un Tempio, con quella delle consonanze musicali, verrà insieme a conformarsi alla proporzione del corpo umano⁴⁰⁸.

Il senso *pratico* che anima l'architetto trapanese nella stesura del trattato, lo induce a elencare una serie di metodi che guidino il giovane progettista nel dimensionamento delle parti in base alla tipologia di tempio (*a forma di Basilica*, a pianta centrica, *a Croce greca*, *ovale* etc.) e nel corretto calcolo delle sezioni murarie resistenti al carico di archi e volte. Appare evidente che tali nozioni discendano da una consolidata trattatistica di cui Amico è profondo conoscitore; tuttavia, sulla genealogia di alcune norme geometriche per il dimensionamento delle masse murarie o sulle nozioni legate alla «sodezza» delle fabbriche, poco è ancora noto.

Sulle questioni di matrice strutturale, l'architetto trapanese chiarisce già nel primo libro come procedere al dimensionamento delle fondazioni in ragione dell'altezza della fabbrica⁴⁰⁹, alla determinazione degli spessori murari⁴¹⁰ e alle tecniche costruttive per garantire durabilità e resistenza delle murature. Ciascuna delle regole proposte da Amico ha un suo fondamento basato su principi geometrici e proporzionali. Una tale formulazione del problema statico, il riproporsi di insoliti modelli (come il caso delle cupole a torrini) e di espedienti costruttivi dettati da precise nozioni teoriche, più che discendere esclusivamente dal metodo empirico, sembrano derivare da una serie di teorie e procedimenti ben noti ai professionisti dell'epoca, che ancora oggi attendono una trattazione sistematica. A titolo esemplificativo, si considerino le indicazioni fornite da Amico per «darsi la giusta grossezza alle fabbriche, che dovranno sostenere gli impulsi degli archi di qualsivoglia sorte»⁴¹¹; tali indicazioni permettono il dimensionamento della sezione muraria di un arco dal diametro noto, attraverso semplici costruzioni geometriche⁴¹², codificate nel corso del Medioevo e perfezionate in modo empirico nei secoli successivi [fig. 80]; sarà Galileo il primo a contestare la validità scientifica dell'approccio al dimensionamento delle masse strutturali.

Da queste considerazioni è facile intuire quanto la conoscenza dei fattori tecnologici, geometrici e costruttivi influisca nella ricerca di una teoria generale, che conduca all'individuazione di caratteristiche comuni ai manufatti esaminati; il passaggio dal rilevamento al rilievo, attraverso l'indagine delle matrici geometriche delle fabbriche, persegue il disvelamento delle teorie che i progettisti hanno applicato, modificato o codificato.

Per le fabbriche di Castiglia esiste già un cospicuo repertorio di indagini⁴¹³ sulla *metrología y simetria*, specie in relazione ai contenuti simbolici:

El problema de las proporciones ha sido siempre capital en Arquitectura, pues con ellas se ayuda con modo eficacísimo la impresión que el edificio ha de producir en el espectador (...). Las arquitecturas de la Baja Edad Media, esencialmente espiritualista, buscaron en el predominio de la verticalidad el efecto ultraterreno. Esta es la primera ley de proporción en la época citada.⁴¹⁴

Specifici contributi monografici hanno esaminato le matrici geometriche delle cupole di Zamora⁴¹⁵ e Salamanca⁴¹⁶, senza tuttavia affrontare le implicazioni statiche. Alla luce di tali considerazioni è stata condotta un'indagine sulle cupole finalizzata all'individuazione di comuni matrici geometriche, pur consapevoli che le fabbriche, così come ci sono pervenute, siano frutto di una sovrapposizione di interventi distinti, e che le stesse vicende costruttive possano condurre ad esiti fuorvianti.

La questione cui si tenterà di dare risposta è se, nella circolazione di saperi che coinvolge buona parte dell'Europa sin dal Medioevo, si siano diffusi modelli geometrici e matrici proporzionali utilizzati nella progettazione e costruzione di questa tipologia di cupola.

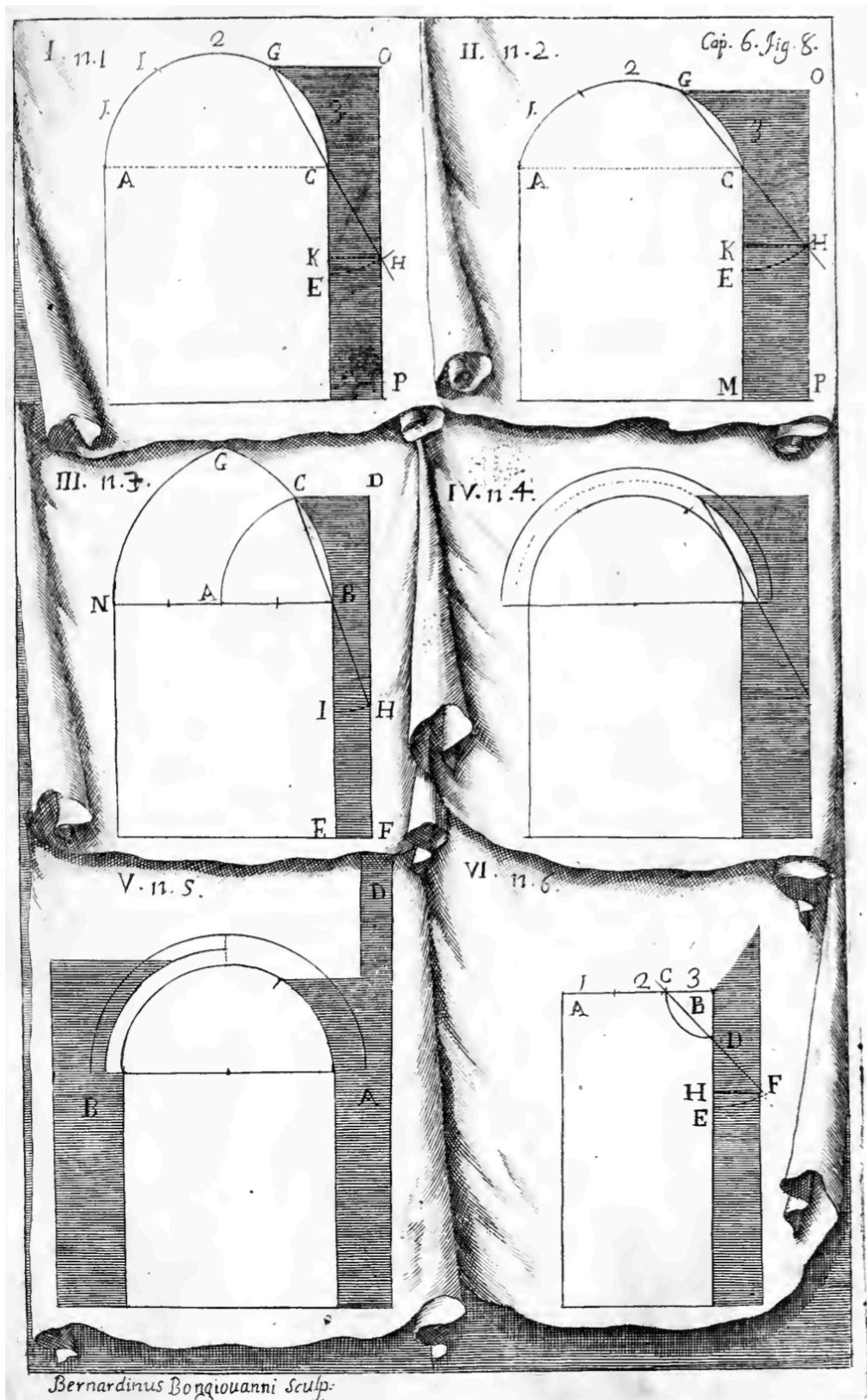


Figura 80; metodo geometrico per il dimensionamento delle murature sottoposte al peso di archi; si noti che per ogni tipo di arco è previsto il medesimo procedimento, che restituisce sezioni diverse in funzione della corda costruita sulla terza parte della semicirconferenza; analogo procedimento è proposto nel caso di architravi (VI). Amico premette che, sebbene tale regola possa essere applicata a ogni arco, è buona norma «che le fabbriche, che avran da sostenere gl'impulsi, abbiano già fatto ragionevol presa, e non si voltino gli archi su delle fabbriche non pur anche asciutte». (AMICO 1750, op. cit., parte I, capo VI, fig. 8).

5.2 Il rilievo delle cupole: applicazioni fotogrammetriche e *laser scanning*

5.2.1 Castiglia e León

Per le acquisizioni delle cupole di Castiglia sono state impiegate procedure di fotogrammetria *Structure from Motion*; tali procedure fotogrammetriche, come già detto⁴¹⁷, consentono la correlazione automatica delle immagini fotografiche e l'estrazione di nuvole di punti da fotografie non strutturate; la restituzione fotogrammetrica con procedure *SfM* si articola in tre fasi: (1) ricostruzione dei punti di presa delle immagini nel sistema di riferimento dell'ambiente virtuale; (2) costruzione di una nuvola rada formata dai punti omologhi rintracciati nelle fotografie; (3) costruzione della nuvola densa.

I primi tentativi sono stati finalizzati alla verifica delle potenzialità dei software *SfM* di maggiore diffusione; le prese fotografiche dell'estradosso della Torre del Gallo della cattedrale di Salamanca, acquisite con una camera reflex digitale⁴¹⁸, sono state processate con il software open-source *VisualSfM* e con il software commerciale *Agisoft Photoscan Pro*. Dal confronto è emerso che, in condizioni di illuminazione fortemente diversificate, la correlazione delle immagini eseguita dal software *VisualSfM* è meno affidabile di quella eseguita da *Photoscan* e conduce alla generazione di modelli separati, che vanno orientati manualmente in un secondo momento. Sebbene la letteratura abbia chiarito che i moderni algoritmi siano in grado di ricostruire scene 3D anche da immagini multi-scala, è stato riscontrato che tale processo è affetto da un certo grado di approssimazione.

Photoscan ha restituito, già dai primi tentativi, un orientamento pressoché privo di anomalie; al fine di

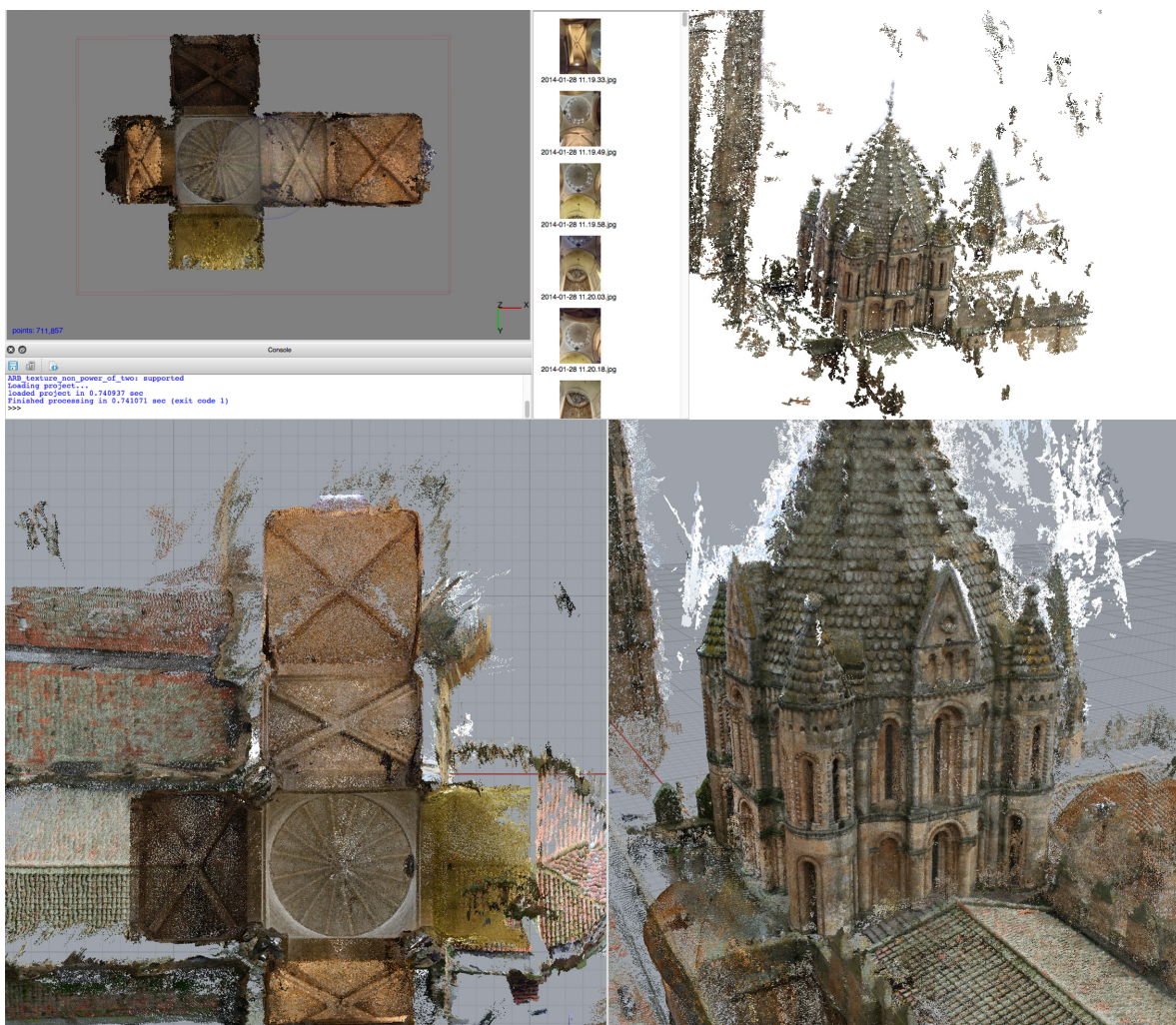


Figura 81; Salamanca, Catedral Vieja, esiti del processo di *dense reconstruction* e orientamento delle nuvole acquisite.

facilitare il processo di correlazione, in alcuni casi si è resa necessaria l'individuazione manuale di punti omologhi in più fotografie. L'esito dei test iniziali ha suggerito di utilizzare il software Photoscan per tutti i processi di restituzione fotogrammetrica con tecniche SfM.

Per il rilievo fotogrammetrico della cattedrale di Salamanca sono state acquisite complessivamente 2.800 immagini. Le fotografie degli esterni e degli interni, preventivamente catalogate, sono state correlate con l'ausilio di coppie di punti omologhi, individuati da markers opportunamente collocati.

Le nuvole di punti, dell'esterno e dell'interno, sono state orientate [fig. 81], anche attraverso l'ausilio di precedenti disegni di rilievo. In particolare, sono stati utilizzati gli elaborati prodotti dall'arch. Valentín Berriochoa (attuale architetto del *Plan Director de la Catedral*⁴¹⁹) durante uno studio del 1986⁴²⁰, successivamente aggiornati in occasione dei lavori di restauro della *Catedral Nueva*, conclusi nel 2002 [fig. 82]. I disegni del 1986, impaginati in cinquantasei tavole, raffigurano con straordinario dettaglio l'intero complesso monumentale delle due cattedrali; le scale di rappresentazione variano da 1:200 per le piante d'insieme a 1:50 per gli ambienti di maggiore pregio. In scala 1:25 sono riprodotti altri elementi architettonici come gli apparati decorativi delle finestre e alcuni particolari costruttivi. Le tavole con numerazione progressiva da 5 a 10 riguardano la *Catedral Vieja* e raffigurano piante e sezioni della fabbrica, sezioni della Torre del Gallo e assonometrie.

Anche il rilievo della cattedrale di Zamora è stato condotto con metodi fotogrammetrici, utilizzando 650 immagini per l'esterno e 140 per l'interno. Dalle coperture della navata e dell'adiacente campanile sono state fotografate porzioni della cupola altrimenti difficilmente documentabili. Il processo di acquisizione e registrazione ha restituito due nuvole dense, in seguito processate con i criteri simili a quelli utilizzati per la cattedrale di Salamanca [fig. 83].

Gli elaborati di un accurato rilievo, completati nel 2009 dall'architetto Angel Casaseca Beneitez su commissione della Consejería de Educación y Cultura della Junta de Castilla y León⁴²¹, hanno integrato la documentazione della fabbrica disponibile per questo studio; i disegni, impaginati in 24 tavole, con scale di rappresentazione comprese tra 1:600 (*emplazamiento*) e 1:100 (elementi di dettaglio), hanno contribuito a verificare alcune ipotesi sulle matrici geometriche della cupola.

Nel caso della Colegiata di Toro l'indagine geometrica è stata condotta con il solo ausilio degli elaborati prodotti durante un precedente rilievo⁴²².

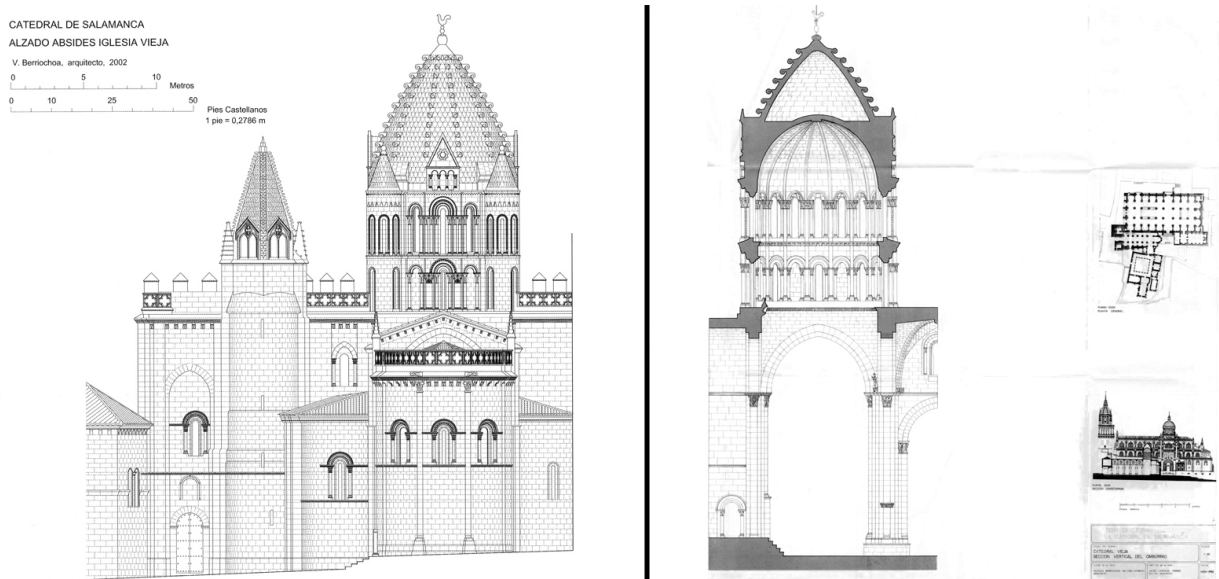


Figura 82; Valentín Berriochoa, disegni della Catedral Vieja di Salamanca.

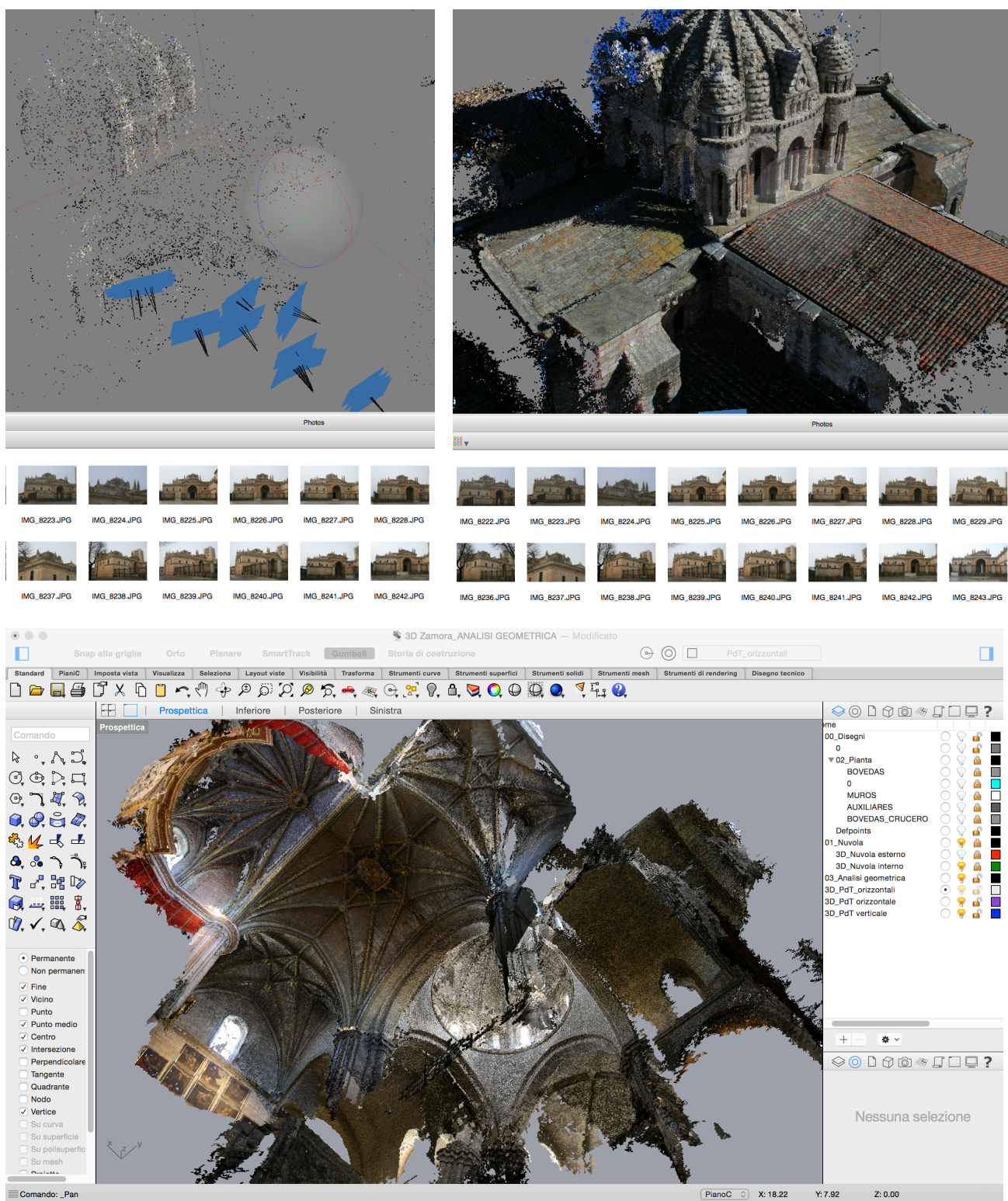


Figura 83; (a) orientamento interno delle camere e acquisizione della nuvola rada (estradosso della cupola di Zamora) attraverso procedure SfM; (b) acquisizione della nuvola densa dell'estradosso della cupola di Zamora; (c) nuvola di punti acquisita all'interno.

5.2.2 Sicilia

Durante la campagna di rilevamento sono state acquisite complessivamente 31 scansioni, relative alle due chiese di Licata e Trapani; le acquisizioni sono state eseguite con due strumenti distinti. Nel primo caso è stato utilizzato uno scanner a impulsi *Leica Scan Station II (ToF scanner)* [fig. 84.a], dotato di portata nominale pari a 300 metri e risoluzione millimetrica; il sensore ottico integrato nello strumento ha permesso di acquisire nuvole “colorate” con valori RGB; le acquisizioni di una precedente campagna di rilievo sono state integrate ai nuovi dati acquisiti attraverso note procedure di registrazione. Nella cattedrale di San Lorenzo, le acquisizioni sono state eseguite con uno scanner a modulazione di fase *Leica HDS 7000*, con portata nominale pari a 187 metri e risoluzione sub-millimetrica [fig. 84.b].

La correlazione tra le scansioni di interni ed esterni è avvenuta attraverso l'uso di target⁴²³, rilevati sia dallo scanner che da una stazione totale topografica. La registrazione delle nuvole di punti è stata eseguita con il software Leica Cyclone 8.

Durante un precedente rilievo sulla chiesa di Sant'Angelo a Licata è stata condotta campagna di acquisizioni *laser scanning*⁴²⁴. L'esame delle nuvole ha suggerito una nuova campagna ad integrazione della precedente, durante la quale sono state acquisite tre scansioni per l'esterno, al fine di conferire maggiore dettaglio all'estradosso del tamburo e ai raccordi murari tra quest'ultimo e i torrini. Cinque nuove scansioni all'interno della fabbrica sono servite a completare l'acquisizione di una delle due navate laterali e l'intradosso della cupola con maggiore dettaglio. La figura 85 mostra il piano di acquisizioni appena descritto.

Il processo di registrazione è stato eseguito in tre fasi, orientando separatamente le scansioni delle due distinte campagne: una prima fase ha riguardato l'orientamento delle scansioni interne ed esterne della prima



Figura 84; (a) scanner Leica San Station II durante le acquisizioni dell'estradosso della cupola di Licata; (b) rilievo della cupola di Trapani con scanner HDS7000.

campagna di rilievi, impiegando i target visibili nelle nuvole e ove non presenti i punti omologhi riconoscibili nelle scansioni; nella seconda fase sono state eseguite le registrazioni delle nuove acquisizioni, ancora una volta per mezzo di target; durante la terza fase le due nuvole precedentemente ottenute sono state registrate per mezzo di punti omologhi. Al termine del processo, la correlazione tra le singole scansioni è stata ottimizzata per mezzo di procedure automatiche. Le dimensioni dello sporto di alcune cornici marcapiano e gli spessori murari dei torrini che contengono i *caracol* per la salita alla calotta sono stati acquisiti con metodo diretto.

In figura 86 sono riassunti gli esiti dell'orientamento delle nuvole acquisite nella chiesa di Sant'Angelo a Licata. Vista la complessità di un rilievo così ampio e la difficoltà nel posizionamento degli strumenti, le dimensioni dello sporto di alcune cornici marcapiano e gli spessori murari dei torrini che contengono i *caracol* per la salita alla calotta sono stati acquisiti con metodo diretto.

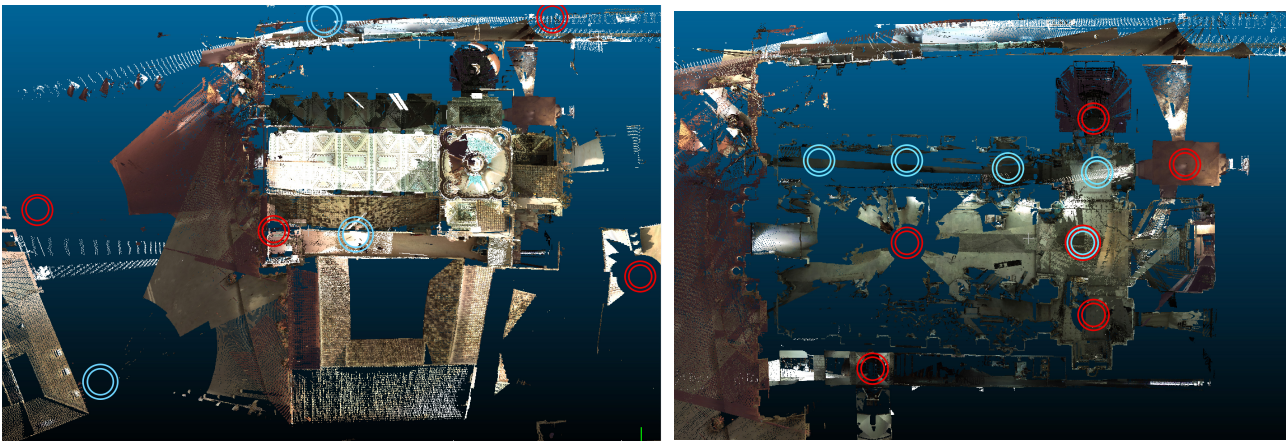


Figura 85; vista ortografica dall'alto e sezione orizzontale della nuvola di Licata; in rosso le stazioni della prima campagna di rilievo (Officina per le Arti Opera s.r.l.) in azzurro la nuova campagna di acquisizione.

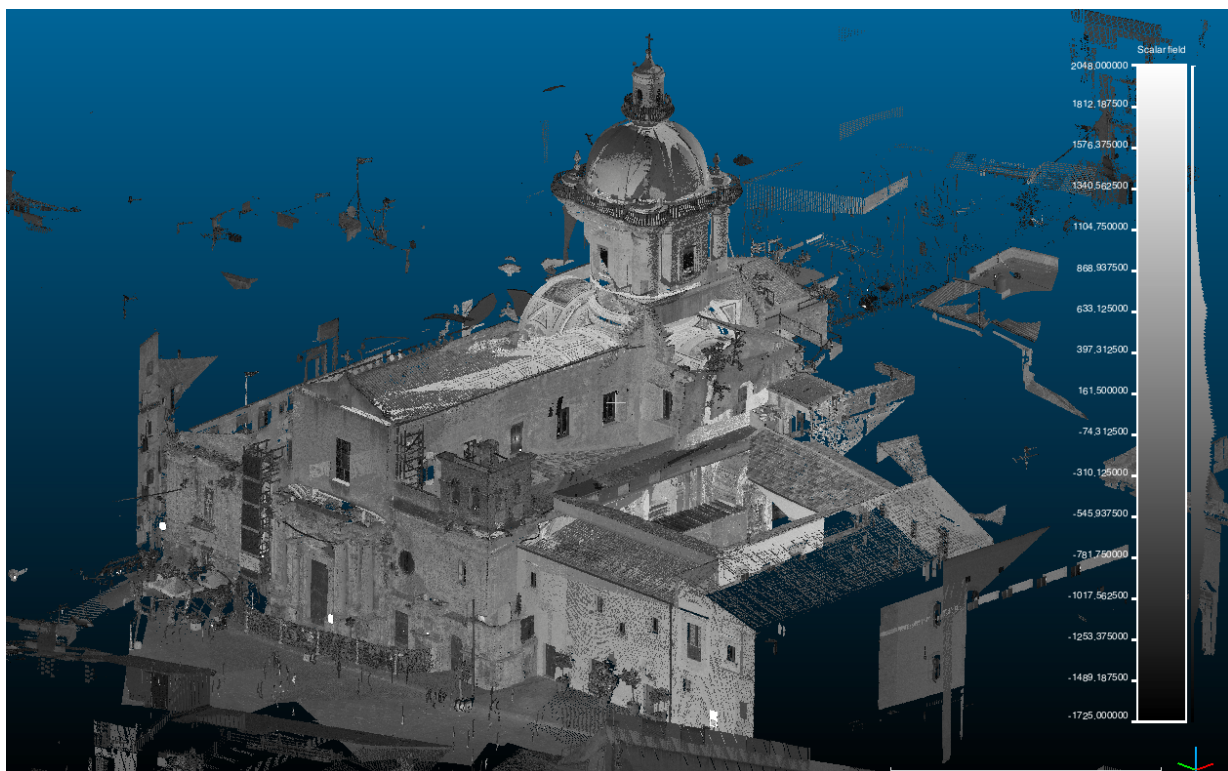


Figura 86; vista assonometrica della nuvola di punti acquisita a Licata.

Nella chiesa di San Lorenzo le acquisizioni sono state eseguite in più riprese; durante la prima fase sono state acquisite le superfici esterne della chiesa attraverso una complessa rete di stazioni sulle terrazze degli edifici limitrofi e una stazione in prossimità della monumentale facciata; due successive stazioni, nel portico della chiesa e, all'interno, in prossimità della crociera, sono state acquisite al fine di favorire la registrazione tra le scansioni dell'esterno e quelle degli interni. Tale espediente ha permesso di orientare l'estradosso e dell'intradosso della cupola. La rimanente parte della fabbrica è stata acquisita in un secondo tempo con minore grado di dettaglio.

La fase di registrazione è stata eseguita con modalità analoghe a quelle precedentemente descritte, utilizzando sia target che punti omologhi; alcune delle nuvole acquisite sono state preventivamente processate eliminando tracce di vegetazione che avrebbero potuto alterare gli esiti della registrazione. Lo scanner impiegato per il rilievo di Trapani integra una livella elettronica in grado di stabilizzare lo strumento, ricavare le verticali di ogni scansione e ruotare automaticamente le nuvole secondo tali allineamenti; ciò ha semplificato le procedure di orientamento delle nuvole vincolando le variabili al solo piano orizzontale. La figura 87 riassume gli esiti della registrazione.

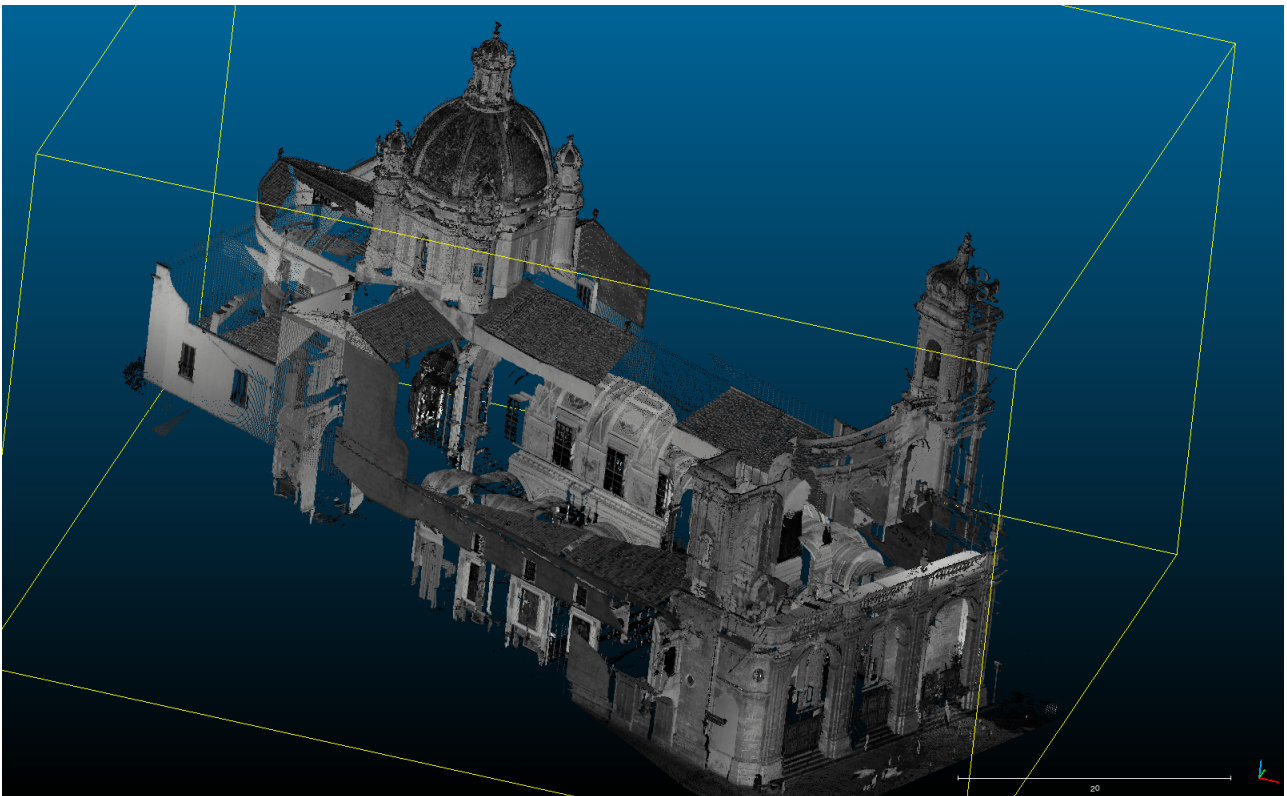


Figura 87; vista assonometrica della nuvola di punti acquisita a Trapani.

5.3 Note sui sistemi metrici di Sicilia e Castiglia

Mentre dal Regno si attendevano le risposte, occupati noi nell'esaminare le diverse misure di Palermo, vedemmo, non senza sorpresa, che la capacità del tumulo era la stessa che quella del mezzo barile, che questo dividevasi in venti quartucci, e che la quantità di olio di olivo comune, lampante, contenuta in un quartuccio era uguale al peso del rotolo: cosicché altro non mancava al sistema delle misure di Palermo, perché tutto dipendesse da un solo ed unico elemento, se non che il lato del cubo uguale al tumulo fosse uguale al palmo. Ma questa uguaglianza fu appunto ciò, che non trovammo, comunque la differenza risultasse assai piccola. [...]

Che se presentemente il palmo è alquanto minore di quanto fu da principio stabilito, ciò ripeter non si deve, che da una piccola alterazione avvenuta nel campione della canna, che oggi si conserva presso il Console de' Mercanti [...]. Questo non è né in ferro né in metallo, ma in legno, e propriamente nell'incavatura di una ben massiccia asta di noce, rivestita di fogliami e di altri lavori di argento. Una leggerissima mancanza nella sua prima costruzione per la inesattezza nel lavoro, il naturale ordinario restringimento del legno pel tempo, e l'incurvatura dell'asta pel proprio peso, hanno per avventura potuto e dovuto cagionare l'attuale piccola differenza. Se a ciò si aggiunge che l'asta medesima è stata in diversi tempi racconciata, come si rileva da vari pezzi di legno, che sono stati posteriormente sovrapposti, non potrà rimanere alcun dubbio sulla sua alterazione.⁴²⁵

Con queste e analoghe motivazioni, nel 1809, i tre esperti della *Deputazione incaricata della riforma de' pesi e delle misure* giustificavano al sovrano Ferdinando III Borbone l'inadeguatezza delle unità di misura del regno e ne proponevano una riformulazione complessiva che avrebbe abolito ogni differenza locale. Prima di allora, sebbene l'unità di misura della lunghezza per tutta la Sicilia fosse la canna, vi erano sette distinte formulazioni locali riferite alle principali città dell'isola: così si distingueva la canna di Palermo da quelle di Messina, Lipari, Acireale, Caltagirone, *Girgenti* e *Castrogiovanni* (Enna). Città come Trapani e Licata facevano riferimento ai *moduli* delle città più prossime, pertanto la canna di Palermo era impiegata anche a Trapani e la canna di Girgenti anche a Licata. La prossimità geografica non era tuttavia una regola sempre valida, come è ravvisabile nella città di Catania, che aveva adottato la medesima canna di Palermo. Naturalmente da tali variazioni locali dipendeva anche il noto sistema di multipli e sottomultipli che manteneva comunque lo stesso sistema proporzionale:

1 Palmo, equivalente a 1/8 della canna;
1 Oncia, equivalente a 1/12 del palmo;
1 Linea, equivalente a 1/12 dell'oncia;
1 Punto, equivalente a 1/12 della linea.

L'emanazione di una legge che unificava l'intero sistema metrico del regno, fissava univocamente la dimensione della *Canna legale di Sicilia* (206,4872 centimetri) in funzione delle cosiddette *Canne abolite*, al fine di garantire la rapida conversione alla nuova unità di misura.

Il *Codice Metrico Siculo* riporta le tabelle di conversione della Canna Legale per ogni città dell'isola e, di conseguenza, per ciascuna delle sette canne locali; da ciò si evince che, posta pari a uno la Canna legale, si hanno:

Canna di Palermo abolita	= 0 canne	7 palmi	11 once	1 linea	7,20 punti
Canna di Trapani (v. Palermo)	= 0 canne	7 palmi	11 once	1 linea	7,20 punti
Canna di Girgenti abolita	= 1 canna	0 palmi	0 once	0 linee	5,03 punti

Quest'ultima espressa anche come proporzione

Canna di Girgenti abolita/Canna legale= 293/288

Ricavando le dimensioni in centimetri delle unità di misura in uso prima della legge del 1809 si ha:

Canna di Palermo e Trapani (ante 1809) = 204,6142 centimetri

Canna di Girgenti (ante 1809) = 206,5021 centimetri

Tali dimensioni erano impiegate come riferimento per ogni genere di lunghezza; gli unici sottomultipli della canna impiegati nella progettazione, nella costruzione e nei computi metrici erano il palmo e l'oncia.

Spesso, come fa notare Edoardo Dotto⁴²⁶, nelle relazioni di progetto e nei contratti di fornitura anche l'oncia era sostituita da una frazione del palmo, dividendo quest'ultimo in 2, 3 o 4 parti. Pertanto, nel dover indicare, ad esempio, una dimensione di quattro palmi e sei oncie, non era insolito trovare l'indicazione 4 palmi e $\frac{1}{2}$.

Nella Spagna del XII secolo, e fino all'adozione del sistema metrico decimale nel 1852, si contavano ben venti unità di lunghezza differenti. I primi tentativi di uniformare l'intero sistema metrico, che risalgono alla prima Età Moderna, imponevano il *pie de Burgos* come modulo univoco; tale provvedimento rimaneva tuttavia inascoltato per secoli. A regolare l'antico sistema metrico spagnolo è il corpo umano con le sue proporzioni; in Castiglia, l'unità di misura più diffusa era il *pie castellano*, equivalente a 27,86 centimetri. Da tale unità derivavano multipli e sottomultipli, riferiti alle principali misure del corpo, tra i quali la *vara castellana* (equivalente a tre *pies*), corrispondente alla dimensione misurabile da un gomito all'altro, mantenendo le braccia stese in posizione orizzontale, e la *braza castellana* (equivalente a due *varas*), corrispondente all'intera estensione delle braccia aperte. L'antico sistema metrico castigliano può essere così sintetizzato:

Pie castellano = 27,86 centimetri

Vara castellana = 83,58 centimetri

Braza casellana = 167,16 centimetri

Come già osservato, nel rilievo diviene fondamentale la scelta dell'unità di misura, da usare come chiave di lettura per i dati acquisiti. Da questo punto di vista, sin dalla sua formulazione, il sistema metrico decimale ha garantito lo scambio di informazioni codificate secondo un metodo di lettura universale, ma ha prodotto in settori come quello della rappresentazione cartografica, dell'architettura e del rilevamento, una frattura tra unità di misura antiche, legate a concetti antropometrici, e una unità di misura derivate dal metodo scientifico, lontane quindi da qualsiasi rapporto antropometrico.

Nel misurare edifici storici è necessario prestare attenzione alla compatibilità e alle possibili interferenze tra il sistema metrico usato per l'acquisizione dei dati e il sistema antropometrico legato alla fase di interpretazione e restituzione. Appare evidente che, nel caso dei manufatti esaminati, il sistema metrico decimale sia del tutto inadeguato all'interpretazione dei dati e che ci si debba riferire invece alle antiche unità di misura impiegate per la progettazione di tali fabbriche.

È evidente che le matrici geometriche impiegate per il dimensionamento di una fabbrica, mantenendo inalterate le proporzioni che le definiscono, possano in parte prescindere da considerazioni di natura dimensionale; tuttavia, la ricerca dei tracciati regolatori di fabbriche tipologicamente affini ma così distanti geograficamente e cronologicamente, non può fare a meno di ricondurre l'opera a tali unità di misura, poiché

sapere quali sono le relazioni tra multipli e sottomultipli in un sistema di misura, può spesso chiarire la preferenza per precise partizioni ritmiche, così come la conoscenza dell'unità di misura

può spiegare il perché del ricorrere di alcune lunghezze che, nel nostro sistema metrico, si esprimono con numeri con parecchi decimali.⁴²⁷

5.4 Indagini geometriche e ipotesi di progetto per le cupole di Castiglia e León

5.4.1 Zamora

La configurazione geometrica della cattedrale di Zamora è riconducibile prevalentemente a una composizione di triangoli e quadrati, secondo una tradizione compositiva che attribuiva a tali figure irrinunciabili valenze simboliche⁴²⁸. Le vicende costruttive della fabbrica sembrano riflettersi anche nei tracciati geometrici che ne regolano la forma; infatti, oltre a essere palese l'impiego del *pie castellano* come modulo per l'intero complesso, appare altrettanto evidente che il corpo medievale e la cinquecentesca *cabecera* rispondano a criteri geometrici distinti; nelle parti più antiche della fabbrica si riscontra prevalentemente l'uso dei multipli di 2 e 3 (in particolare 16, 20 e 32) e della sezione aurea; presbiterio e abside rispondono ad altre logiche progettuali.

La fabbrica è inscritta in un rettangolo di 90x210 *pies*, misurato includendo gli spessori murari perimetrali [fig. 88]; le campate delle navi laterali hanno forma pressoché quadrata, con luce pari a circa 20 *pies* (mediamente 550 centimetri), al netto di deviazioni trascurabili; tale dimensione costituisce anche il lato corto delle campate rettangolari della navata centrale, la cui dimensione trasversale è ricavata costruendo un rettangolo aureo sul lato del quadrato; il rettangolo così ottenuto ha dimensione pari a 20x32 *pies*. I sostegni della navata hanno un profilo mistilineo cruciforme, inscritto in un quadrato di lato pari a 8 *pies* e avente un nucleo, anch'esso quadrato (4 *pies*) sul quale, per ciascun lato, si addossano tre semicolonne (due laterali da 1 *pie* di diametro e quella centrale da 2 *pies*).

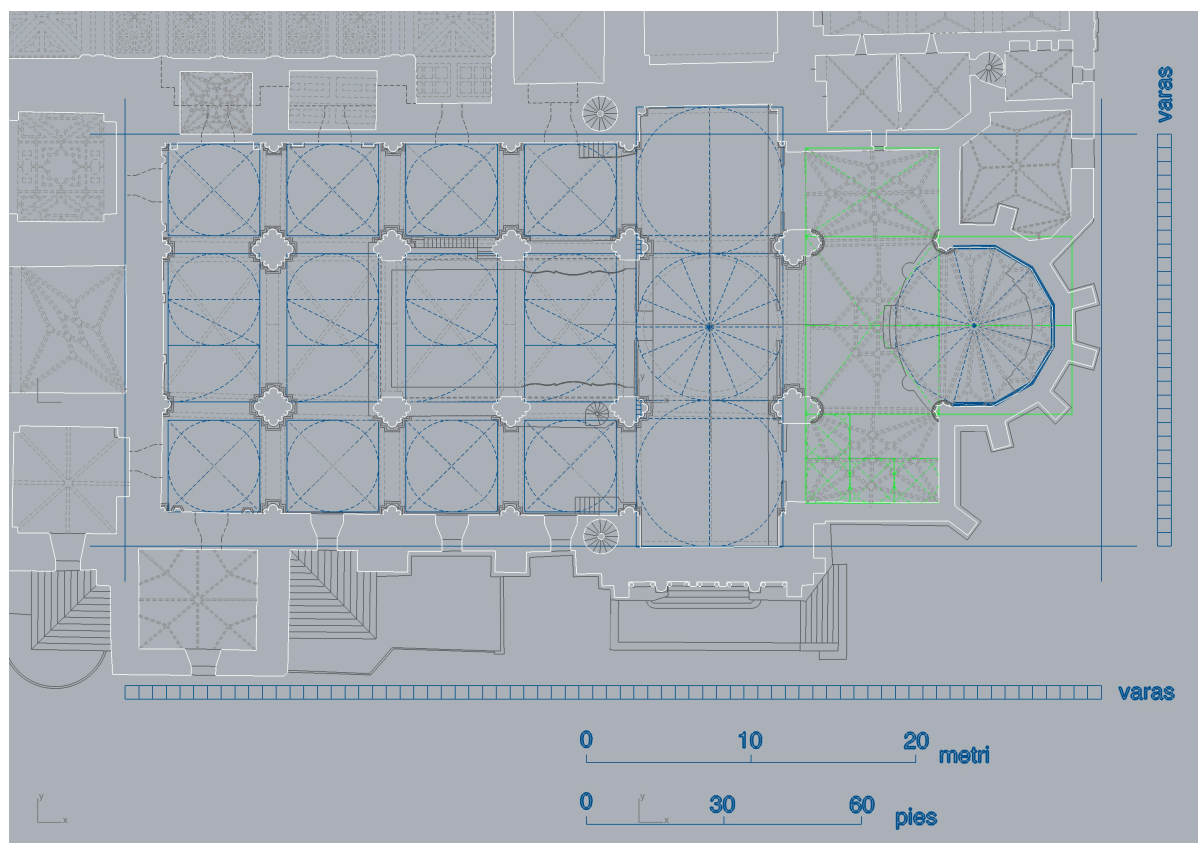


Figura 88; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, matrici geometriche della pianta; scala in *pies*.

Il vano comprendente crociera e transetto, ritmato dai pilastri che sostengono la cupola, è un rettangolo di lato maggiore pari al triplo del minore (diapason diapente); si ottiene pertanto una dimensione complessiva di 32x96 *pies* di luce netta; le campate laterali del transetto, al netto dello spessore degli archi della crociera, hanno luce pari a 32x28 *pies*; la crociera descrive invece un quadrato avente lato di 32 *pies*. Si ricava uno spessore dei sostegni pari a 4 *pies*.

Solo presbiterio e abside divergono dal semplice schema geometrico sinora descritto; il presbiterio abbraccia un'area di tre campate, formando un rettangolo i cui lati stanno in un rapporto di 3:8 (diapason diatessaron); il nuovo modulo individuato, un terzo dell'ampiezza del presbiterio, è pari a circa 10 *pies*. In base a questa interpretazione geometrica, le due campate laterali avrebbero una misura pari a 3x2 moduli; mentre la campata centrale, di ampiezza doppia rispetto alle laterali, sarebbe pari a 3x4 moduli. Infine un dodecagono regolare avente centro sulla proiezione della chiave iscrive il profilo icnografico del catino absidale; di tale dodecagono sono visibili sette lati, mentre i rimanenti cinque sono occultati dal taglio del presbiterio; inoltre, la porzione di poligono rimanente può inscrivere in un rettangolo avente le medesime dimensioni della campata centrale del presbiterio [fig. 89].

Considerando le differenze tra i due sistemi proporzionali appena descritti, non stupisce che il semplice rigore geometrico della fabbrica medievale sia stato stravolto proprio nella *cabecera*, frutto di vicende costruttive cinquecentesche.

Anche l'alzato sembra rispondere alle medesime logiche di progetto della pianta; l'altezza della navata centrale è determinata ancora una volta attraverso la sezione aurea: assimilando la lunghezza della nave al lato maggiore del rettangolo aureo si costruisce a ritroso la dimensione del lato minore, equivalente all'altezza della nave [fig. 90]. Il rettangolo aureo è riproposto in altre due occasioni: il primo si ritrova nello spazio delimitato dai sostegni polistili che sorreggono le grandi volte della navata centrale e dalla cornice continua che separa il primo dal secondo ordine; il secondo rettangolo aureo, che ha le medesime dimensioni di quello ottenuto con il dimensionamento delle campate maggiori della nave (20x32), è impiegato negli archi del primo ordine della navata; in quest'ultimo caso, l'ampiezza degli archi e l'altezza delle semicolonne minori (20 *pies*) rappresentano i lati del quadrato, mentre la cuspidine dell'arco, che raggiunge la quota di 32 *pies*, determina la lunghezza del lato maggiore [fig. 91].

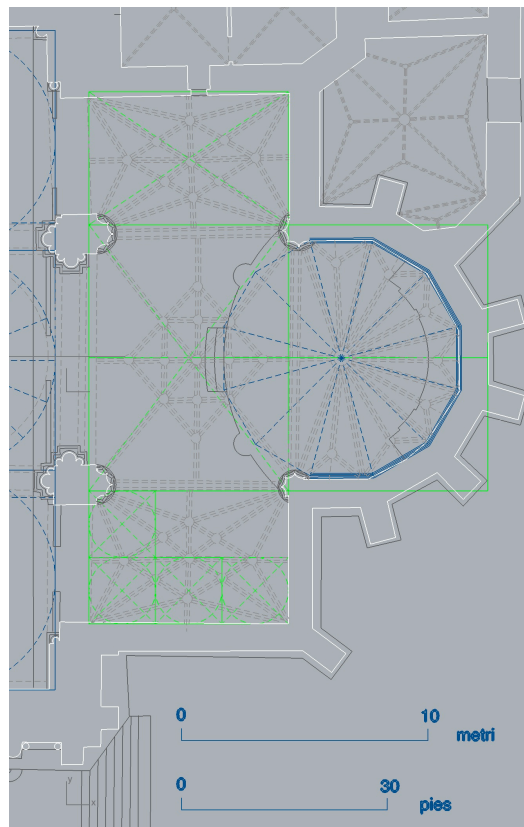


Figura 89; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, matrici geometriche della *cabecera*.

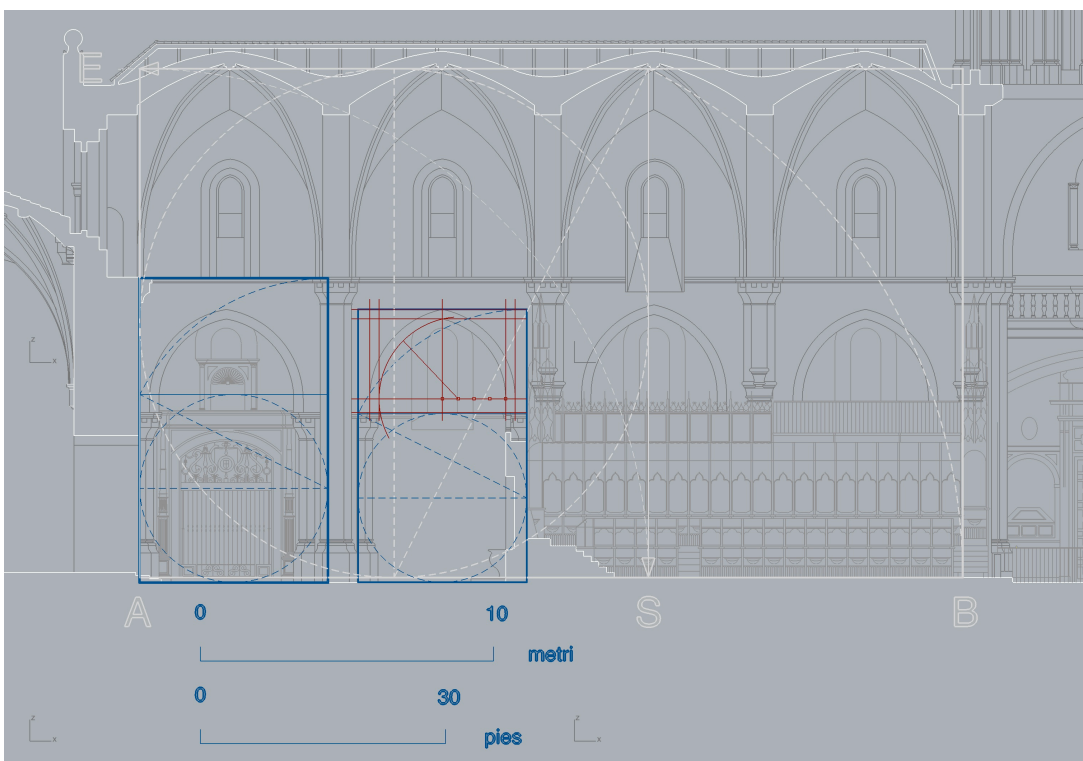
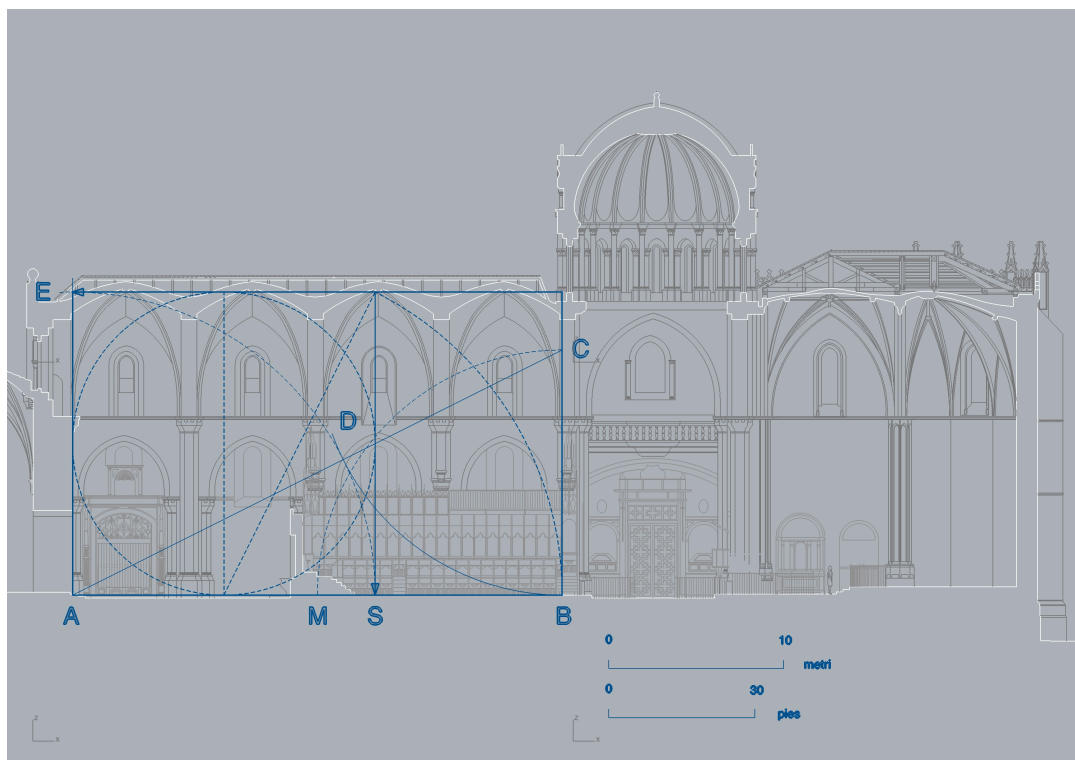


Figure 90-91; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, metodo di dimensionamento della navata per mezzo del rettangolo aureo; in rosso la costruzione geometrica dell'arco acuto della navata.

Nella crociera, sopra la cornice continua che separa i due ordini della navata centrale, si impostano gli archi acuti e i pennacchi che sostengono la cupola; le superfici dei pennacchi sono inscrivibili in un parallelepipedo a base quadrata (32 *pies* di lato), la cui altezza è pari a $\frac{3}{4}$ del lato di base (24 *pies*); l'arco acuto, di ampiezza complessiva pari a 26 *pies*, si imposta su un sovrassesto di 3,5 *pies*. La traiettoria descritta

dall'arco acuto è determinata dall'intersezione di due circonferenze con centri posti a $1/12$ dell'ampiezza complessiva dell'arco [fig. 92].

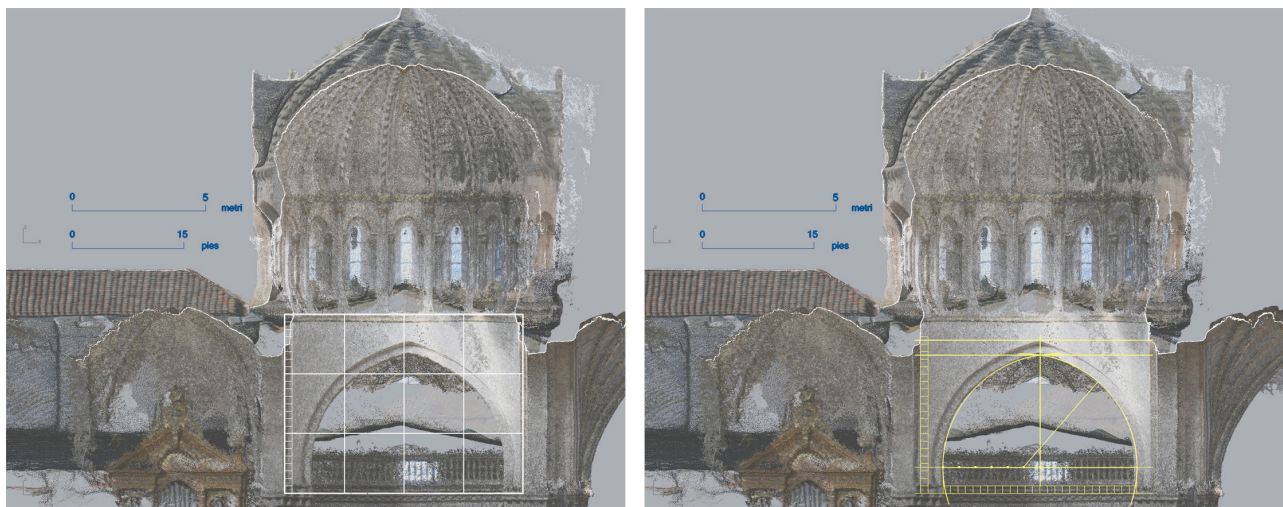


Figura 92; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, dimensionamento del congegno murario dei pennacchi e schema costruttivo degli archi maggiori.

La raffinatezza dello schema geometrico della fabbrica è evidente anche nella cupola, articolata in quattro quadranti simmetrici. L'intero manufatto può essere discretizzato attraverso la composizione e l'intersezione di volumi semplici come la sfera e il cilindro. Il tamburo poggia su uno zoccolo quadrato di 42×42 *pies*, lievemente estroflesso dal sistema di coperture e avente un foro circolare al centro (28 *pies* di diametro) che consente il raccordo con i pennacchi sottostanti; in pianta, il tamburo è delimitato da due cerchi concentrici di 42 e 30 *pies* di diametro [fig. 93]. Il paramento murario inferiore ha un profilo mistilineo, ottenuto dalla disposizione a raggiera di sedici sostegni polilobati in pietra; ciascun sostegno, formato da sei colonnine (tre all'esterno e tre all'interno) addossate a un parallelepipedo centrale, può essere inscritto in un quadrato, ruotato in modo che una diagonale sia orientata in direzione del centro del cerchio. Tra i sostegni si frappone una maglia di conci di collegamento che incornicia le finestre del tamburo. Il paramento murario così delineato ha uno spessore minimo di 1,5 *pies* in prossimità della muratura di collegamento e uno spessore massimo di 5 *pies* misurato lungo la diagonale del quadrato; dal confronto tra gli spessori murari e il diametro del tamburo si desumono le seguenti proporzioni, impiegate per il dimensionamento delle sezioni resistenti:

- lo spessore massimo della muratura (5 *pies*) è di poco superiore all'ottava parte del diametro della circonferenza esterna;
- tale spessore rappresenta la sesta parte della luce netta da coprire (30 *pies*);
- lo spessore minimo (1,5 *pies*) equivale a $1/20$ del diametro della circonferenza interna;
- confrontando lo spessore medio delle masse murarie, pari a 3,25 *pies*, con la luce coperta dalla cupola, pari a 30 *pies*, si ricava un rapporto lievemente superiore a $1/10$;

La sezione muraria si mantiene inalterata sino alla quota di 10 *pies* dall'imposta del tamburo; oltre tale quota si impostano gli archetti in curva che sorreggono la restante muratura; quest'ultima può essere discretizzata per mezzo di due superfici cilindriche concentriche (una per l'intradosso e una per l'estradosso), il cui profilo inferiore è intercettato dalla successione di archi in curva. La distanza tra le due superfici cilindriche è pari a 4 *pies*.



Figura 93; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, matrici geometriche e rapporti proporzionali rintracciati nel tamburo

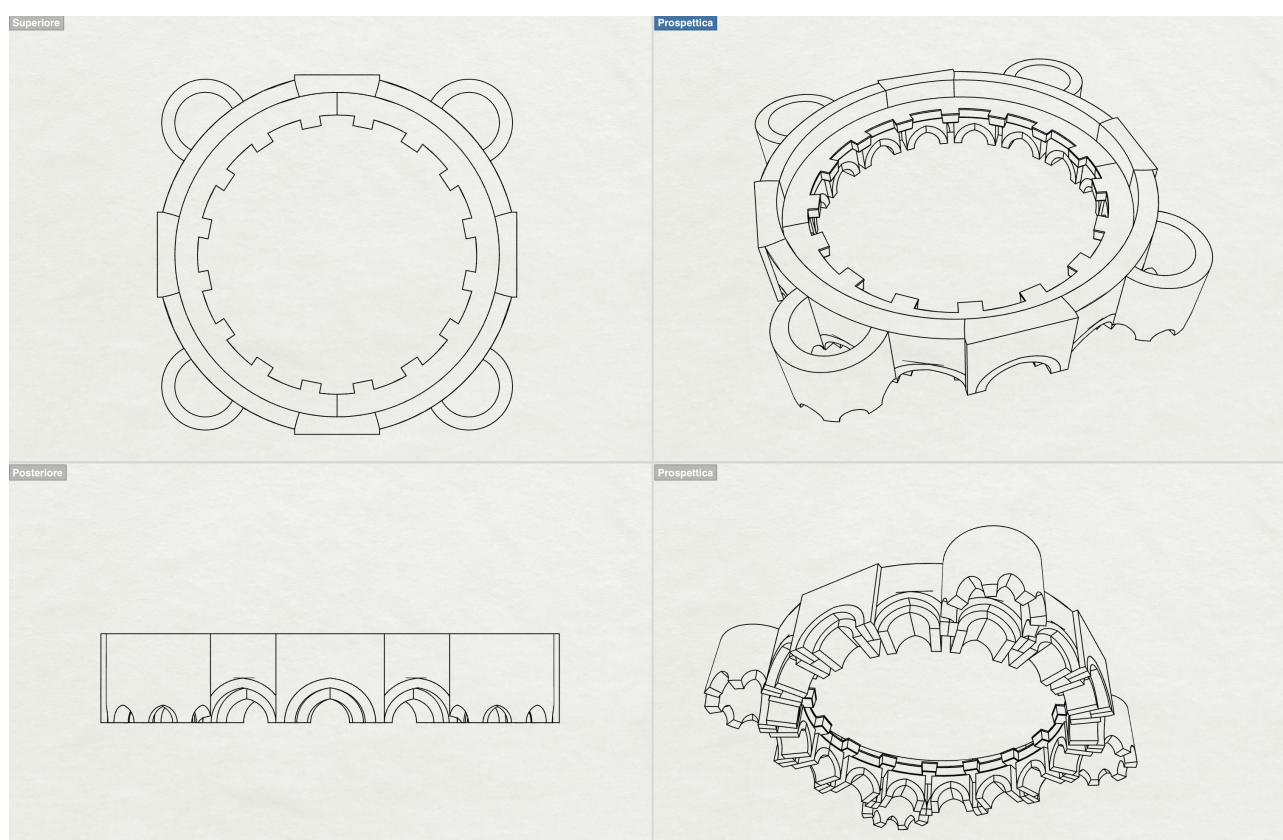


Figura 94; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, modello tridimensionale del tamburo; si noti la serie di archi in curva che contraddistingue il profilo inferiore.

Agli angoli della crociera sono collocati i quattro torrini cavi a sezione circolare che si innestano sul tamburo. Durante le fasi costruttive, la circonferenza dei torrini veniva tracciata presumibilmente per mezzo di tre punti noti; i primi due punti si trovano al centro delle colonnine esterne del tamburo, area in cui la muratura raggiunge la massima ampiezza e sulla quale sarebbe giustificabile un ulteriore irrigidimento; tali colonne, infatti, supportano sia gli archetti del tamburo, sia quelli dei torrini, determinando una particolare intersezione tra superfici cilindriche [fig. 94]; l'individuazione del terzo punto della circonferenza è avvenuta attraverso le indagini condotte sulla nuvola, da cui si desume che il profilo esterno del torrino è tangente al profilo circolare del paramento murario interno del tamburo [fig. 95]; questa condizione di tangenza consente di rintracciare il terzo punto noto, necessario per la costruzione della circonferenza di base; dalla

costruzione per tre punti si ricavano il centro della circonferenza, posto sulla diagonale della crociera, e il diametro, pari a 10 *pies*.

La massa muraria del torrino, che nella parte inferiore è alleggerita dalla presenza delle colonnine che sostengono gli archi, assume la piena configurazione circolare nella porzione superiore, raggiungendo uno spessore di poco superiore a 1,5 *pies*; le circonferenze dei torrini e del tamburo non sembrano essere regolate da specifici rapporti proporzionali.

Anche l'alzato della cupola è impostato su un quadrato di 42 *pies* ed è così dimensionato [fig. 96]:

- a. le sei colonnine addossate che caratterizzano il profilo polilobato del tamburo si impostano su piedistalli a base quadrata, alti 2 *pies*; le colonnine sono alte 8 *pies*, ad eccezione di quella centrale interna, che, come detto, sostiene le costole della volta;
- b. il paramento murario esterno si contraddistingue per la presenza di due archi a rincasso, di spessore pari a 1 *pie* ciascuno; la ghiera maggiore ha un'ampiezza di 5,5 *pies* e raggiunge la quota complessiva di 14 *pies* (misurati dalla cuspide al piano d'imposta del tamburo); all'interno, una sola ghiera di conci si imposta sulle colonnine;
- c. esternamente, la cornice superiore che delimita il tamburo raggiunge quota 18 *pies*;
- d. internamente, la cornice sulla quale si impostano i costoloni è a una quota inferiore rispetto alla cornice esterna (15 *pies* dall'imposta del tamburo), determinando un salto nella muratura;
- e. sugli assi principali della crociera si collocano i ringrossi murari rettangolari con coronamento a timpano, aventi una larghezza complessiva di 11 *pies* nella parte inferiore e di 10 *pies* nella superiore;
- f. sul tamburo si impostano la calotta e i coronamenti dei contrafforti (cupolette dei torrini e timpani).

È utile notare che i coronamenti dei contrafforti si addossano alla calotta determinando un incremento delle sezioni resistenti alla quota delle reni; inoltre, osservando la cupola dall'alto si nota che i punti in cui tali contrafforti si innestano nel tamburo coincidono con le estremità delle costole esterne, aspetto certamente dovuto alla necessità di contrapporre un adeguato bilanciamento alle spinte orizzontali trasmesse dalle costole [fig. 97]. Da ciò appare evidente che torrini e timpani siano stati concepiti per il medesimo scopo statico, che ne ha guidato anche il dimensionamento.

La calotta è costituita da una doppia membrana in pietra, realizzata secondo due distinte tecniche costruttive: la membrana interna, composta da sedici vele *gallonade*, è sostenuta da altrettanti costoloni che descrivono un profilo emisferico di raggio pari a 16 *pies*⁴²⁹; a tale congegno è affidato il ruolo di sostenere i carichi della cupola; la membrana esterna è realizzata attraverso un sistema ad anelli concentrici che riproduce il già citato motivo a squame e ha il solo compito di aumentare la componente verticale dei carichi trasmessi alla struttura. Anche questa superficie esterna ha un profilo circolare, al netto della configurazione *gallonada*; sezionando la nuvola di punti con opportuni piani verticali si ricavano archi di circonferenza aventi diametro 40 *pies*; i medesimi archi si ottengono sezionando le vele *gallonade* in mezzeria. In prossimità del concio di chiave esterno, la traiettoria descritta dalla calotta prosegue lungo la tangente all'arco, individuando così un angolo sotteso di circa 70 gradi.

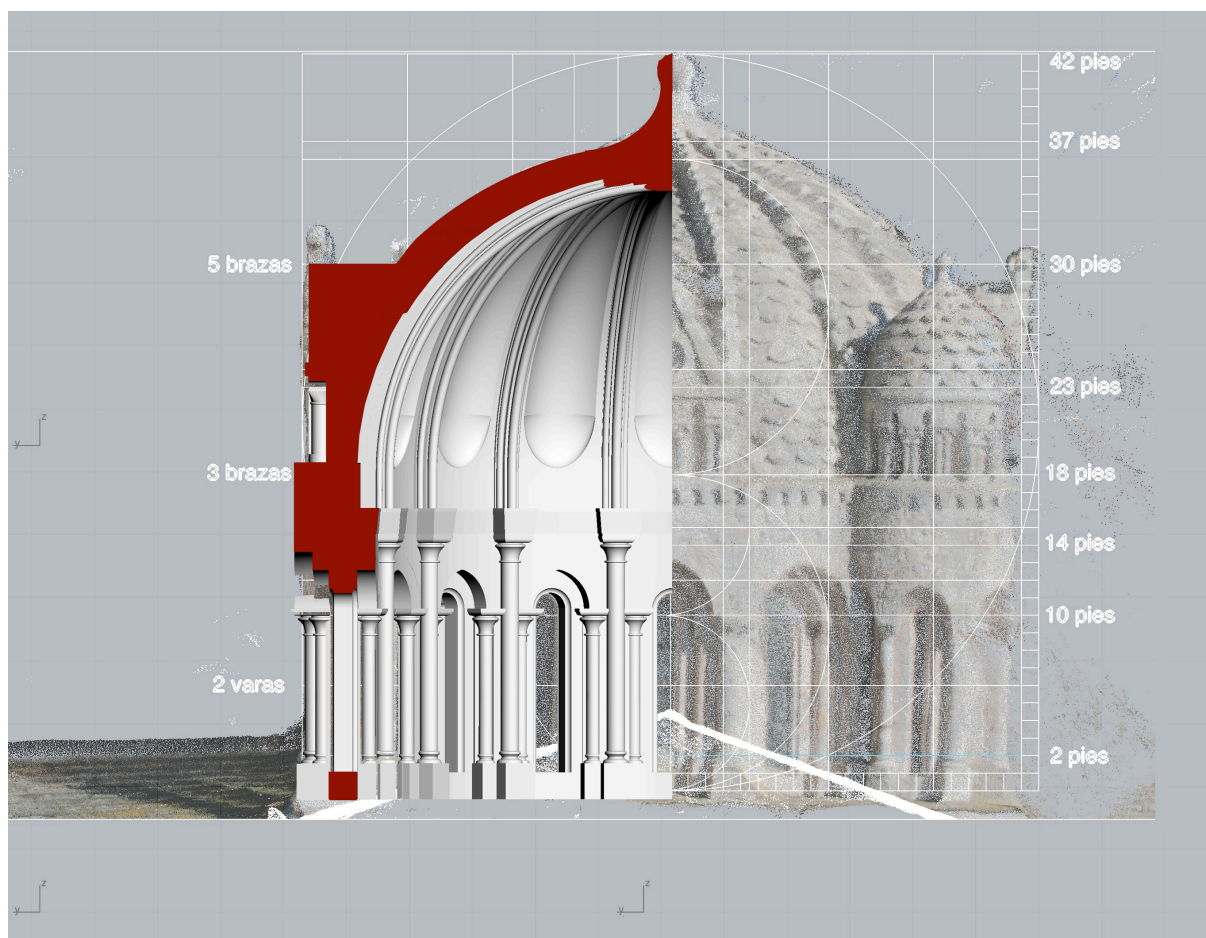
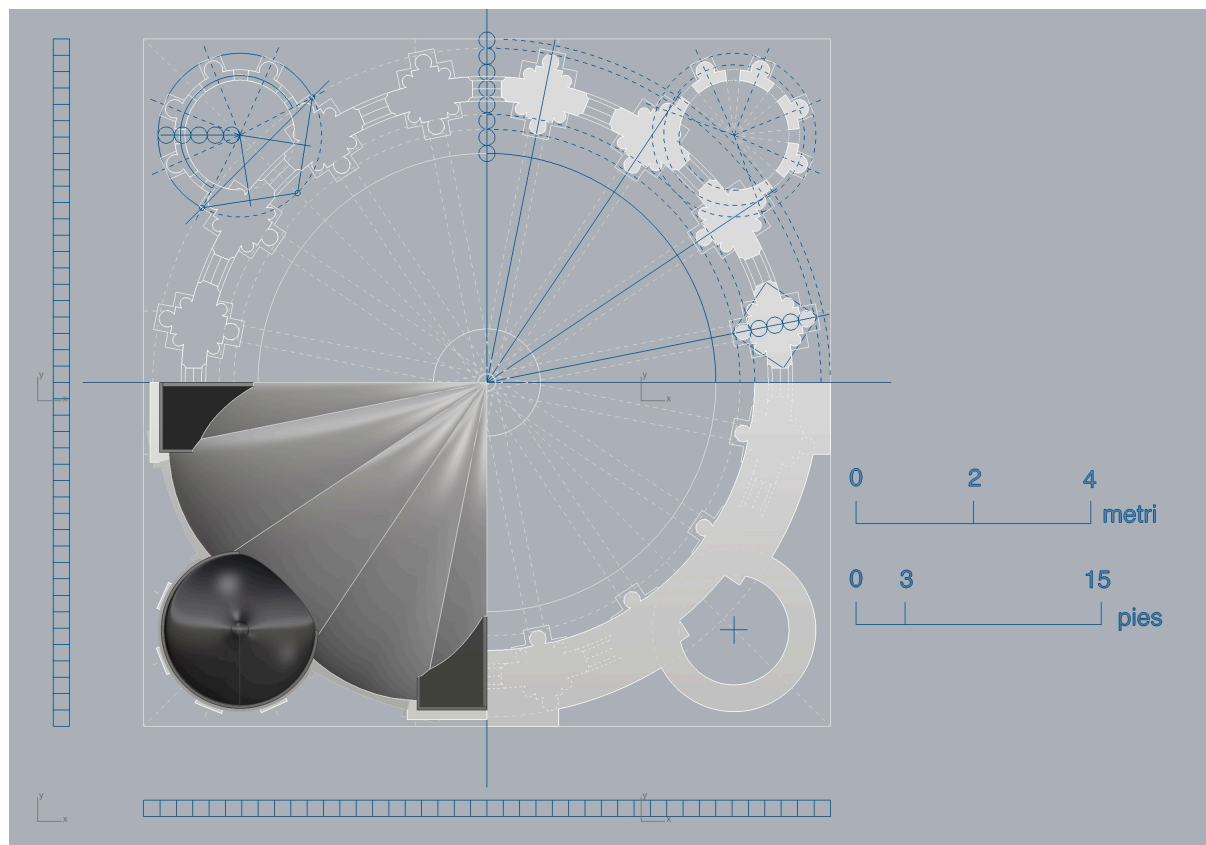


Figure 95-96; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, matrici geometriche individuate nella pianta e nell'alzato della cupola.

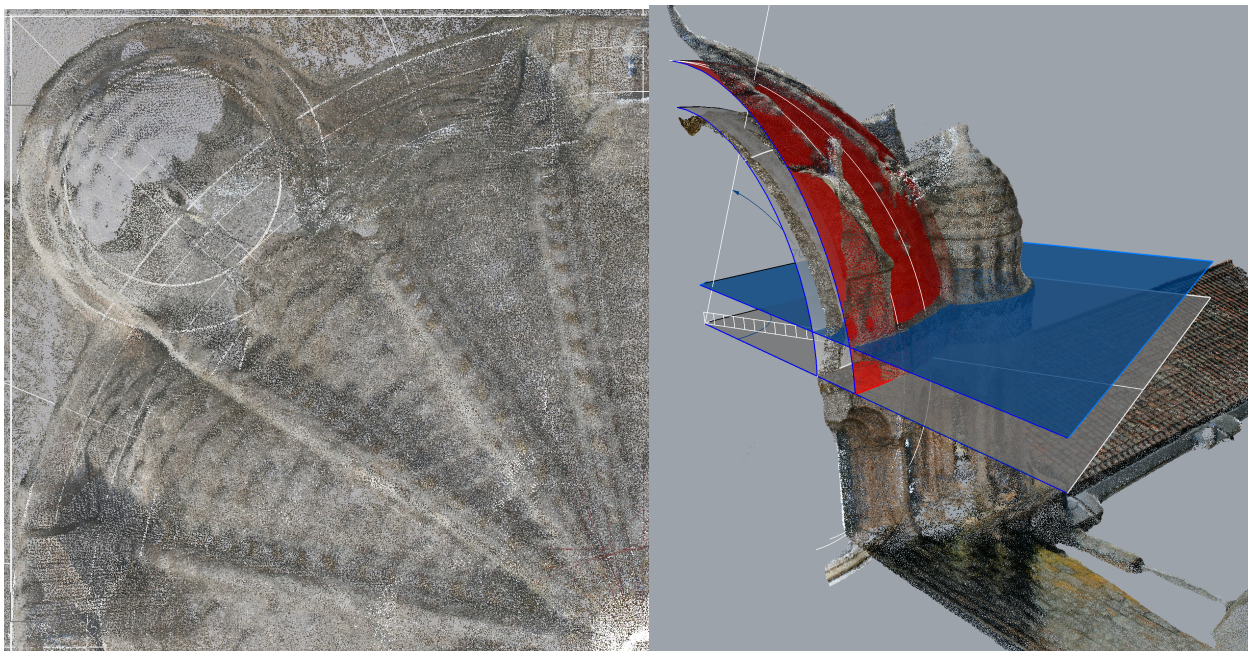


Figura 97; Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, vista ortografica dall'alto della nuvola di punti; si noti la corrispondenza fra le costole esterne e i punti di innesto del torrino.

Figura 98; sovrapposizione di due porzioni di sfera alla nuvola di punti; il piano azzurro, che indica la quota d'imposta della calotta esterna, secca la porzione di sfera su un parallelo non baricentrico; il piano orizzontale di colore bianco raffigura la quota d'imposta della calotta interna e il piano baricentrico delle due sfere.

Dal confronto delle matrici geometriche ottenute emerge che le due calotte sono discretizzabili attraverso due porzioni di sfera concentriche [fig. 98], aventi il centro alla quota d'imposta delle costole interne; come detto, il paramento murario esterno è prolungato oltre tale piano d'imposta per un'altezza di altri 3 *pies*, terminando con la già citata cornice ad archetti; lo spessore di tale paramento murario è di circa 2,5 *pies* (70 centimetri). Da ciò è evidente che la porzione di sfera che racchiude la calotta esterna viene troncata da un piano orizzontale posto a distanza 3 *pies* dal piano equatoriale. Questo insolito espediente doveva certamente stridere agli occhi dei contemporanei, poiché alterava l'armonia della cupola sotto un duplice aspetto: sotto il profilo progettuale, tale espediente limitava la visibilità della calotta esterna; sotto il profilo simbolico, riducendo la semisfera a una sua porzione, discostandosi dall'idea di perfezione che la cupola avrebbe dovuto rappresentare. Per tali ragioni è ipotizzabile che imprescindibili motivazioni statiche abbiano costretto il maestro della fabbrica ad adottare tale accorgimento.

Tornando per un istante alle vicende costruttive della cupola, si rammenti che un primo consolidamento era stato eseguito durante la costruzione del tamburo, ponendo graffe metalliche tra i conci sopra gli archetti interni. Secondo gli studiosi, tale espediente non arrestò le lesioni e costrinse a realizzare i torrini; in realtà, la struttura mistilinea del tamburo, sino a quel momento scarica dai pesi della calotta, difficilmente si sarebbe lesionata tanto profondamente per effetto del solo peso proprio. È plausibile invece che l'espediente delle graffe metalliche, più che configurarsi come un intervento mirato a migliorare la statica del tamburo, abbia costituito un tentativo di consolidamento della calotta non riuscito; secondo tale ipotesi, i lavori sarebbero proseguiti senza particolari difficoltà con la realizzazione della seconda serie di archi esterni e della muratura sino alla quota dei costoloni. Con l'avvio della costruzione della calotta è probabile che il manufatto abbia manifestato cedimenti significativi a causa delle spinte orizzontali trasmesse dalle costole; forse solo a questo punto, constatata l'inefficacia delle graffe, si tentò un vero e proprio intervento di consolidamento strutturale, costruendo un anello in pietra di altezza 3 *pies* e spessore 2,5 *pies*, che cingeva dall'esterno la calotta nel tentativo di arrestare il dissesto. Lo spessore limitato dell'anello rendeva comunque necessario l'innesto di ben più solidi contrafforti sul tamburo; per equilibrare tali spinte, furono aggiunti i torrini sulle diagonali della crociera e i ringrossi murari sugli assi principali, sfruttando, nel primo caso, l'ampio spazio di

risulta tra il cerchio del tamburo e il quadrato della crociera, e nel secondo, lo spazio disponibile a ridosso dei lati del quadrato; infine furono addossati i coronamenti dei contrafforti alla calotta, al fine di fornire un adeguato sostegno anche alle reni.

Questa ipotesi troverebbe valide conferme sia nel dimensionamento dei torrini e dei timpani, ai cui estremi si innestano i costoloni, sia, come si dirà in seguito, nella *teoria membranale* che regola il comportamento strutturale delle cupole⁴³⁰.

Da quanto sinora descritto appare ormai certo che il primo progetto per la cupola di Zamora, di cui si propone una ricostruzione [fig. 99], non prevedesse l'impiego di contrafforti; l'anello di rinforzo in pietra e i torrini, impiegati come efficace risposta al comportamento statico della calotta, sarebbero stati concepiti solo dopo la posa in opera degli strati di copertura e il disarmo delle calotte, momento in cui si sarebbero potuti verificare cedimenti significativi.

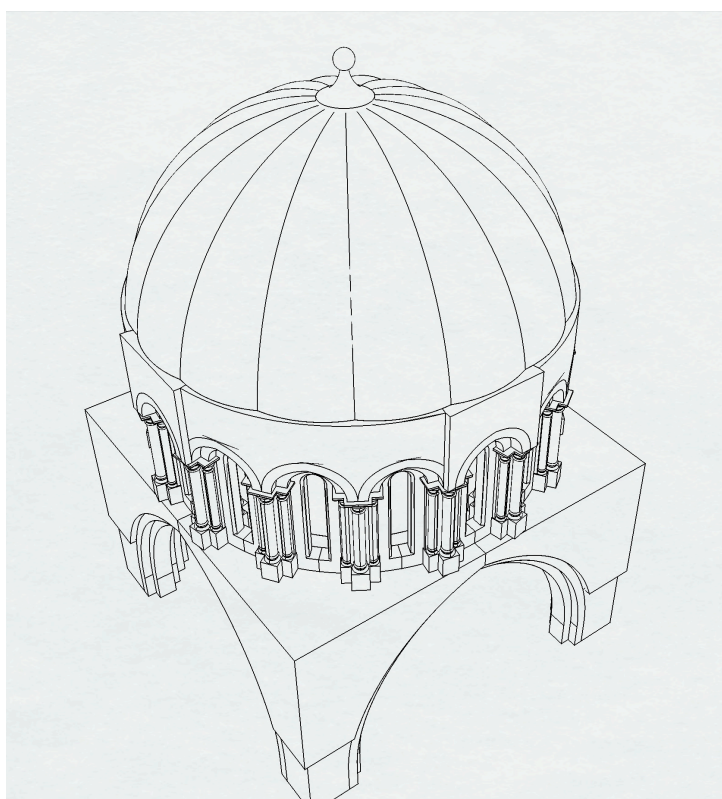


Figura 99, Zamora, Catedral de la Transfiguración del Salvador, ipotesi riconfigurativa della cupola priva di torrini.

5.4.2 Salamanca

Dall'indagine geometrica condotta sulla nuvola di punti della *Catedral Vieja* di Salamanca è emerso l'impiego prevalentemente di multipli di tre e di figure geometriche basate sul rapporto proporzionale di $1/\sqrt{2}$. La pianta, nella configurazione precedente il taglio della navata nord, può essere inscritta in un rettangolo di dimensioni 72x195 *pies*, misurato al netto degli spessori murari [fig. 100]. La costruzione della parete della nuova cattedrale ha alterato l'impianto della navata nord, rendendo le campate di forma irregolare e riducendo l'ampiezza complessiva della fabbrica.

Le navate sono scandite da un passo pressoché costante, al netto di variazioni di lieve entità; la distanza tra gli assi dei pilastri varia tra i 24 e i 25 *pies* e si riduce a 21 *pies* di luce netta se si escludono gli spessori degli archi trasversali che sorreggono le volte. Da quest'ultima dimensione, impiegata per definire la misura longitudinale di ogni campata, si ricava l'ampiezza della navata centrale costruendo un rettangolo

diagoneo⁴³¹ (rapporto $1/\sqrt{2}$): dal quadrato di lato pari a 21 *pies* si ricava il lato maggiore di tale rettangolo come il ribaltamento della diagonale su uno dei lati, ottenendo così una dimensione prossima ai 30 *pies* [fig. 101]. Le campate laterali hanno dimensione 25x21 *pies*.

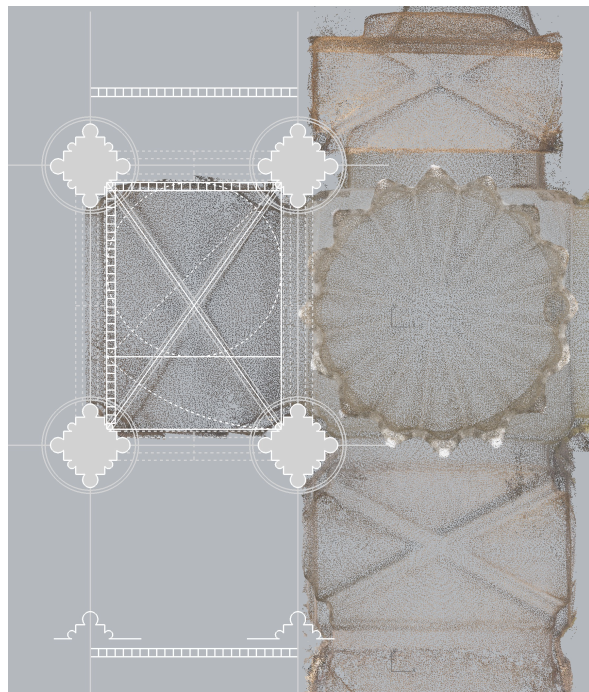
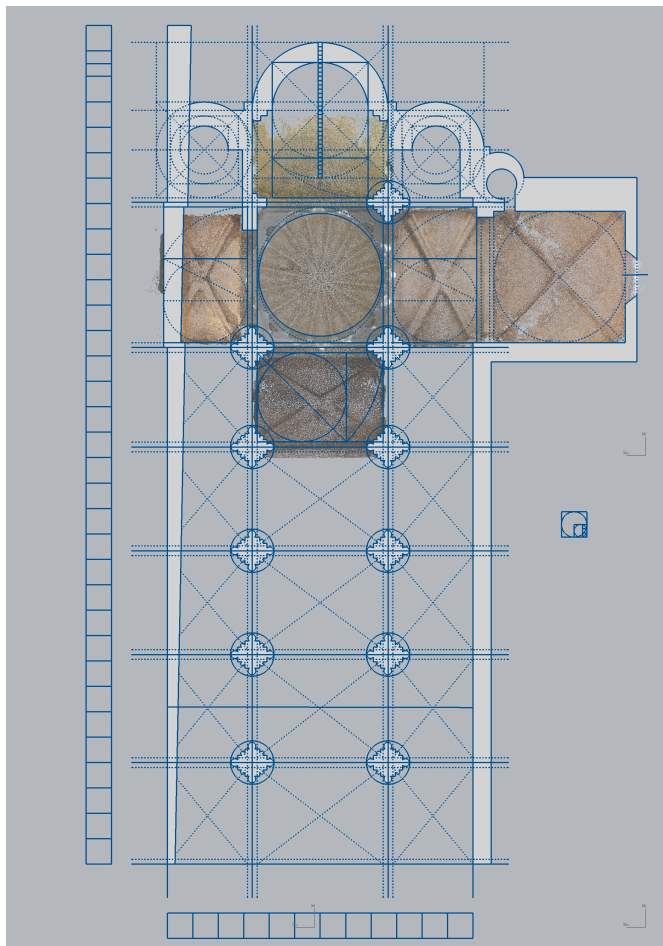


Figure 100-101, Salamanca, Catedral Vieja, schemi geometrici rintracciati nella pianta e particolare della costruzione del rettangolo diagoneo per la navata centrale; scala in *pies*.

I due bracci del transetto hanno profilo planimetrico rettangolare e sono coperti con volte a crociera; il dimensionamento di tali campate avviene per mezzo di un rettangolo aureo, costruito su un quadrato di 20 *pies* di lato (dimensione trasversale della campata); in tal modo si ottiene un vano di 20x32 *pies*, del tutto simile alle proporzioni impiegate per il dimensionamento delle campate nella vicina Zamora.

La terminazione tri-absidata della *cabecera* cela una raffinata composizione di cerchi concentrici, regolata da precisi rapporti proporzionali [fig. 102]. L'abside centrale è descritta da due semicirconferenze concentriche così determinate: la prima circonferenza, di diametro pari a circa 22 *pies*, descrive il profilo interno del catino; dal quadrato circoscritto a tale circonferenza si determina anche il profilo esterno del catino, come circonferenza circoscritta al quadrato; quest'ultima ha diametro pari a 32 *pies*, dimensione che ricorre spesso anche a Zamora e che rimanda a precise connotazioni simboliche. L'anti-coro interrompe le circonferenze concentriche dell'abside maggiore lungo l'asse trasversale; la dimensione longitudinale dell'anti-coro è determinata tracciando un nuovo rettangolo diagoneo a partire dal quadrato posto tra le due circonferenze, mentre la dimensione trasversale è pari al diametro del cerchio esterno; in tal modo si ottiene una campata rettangolare di dimensioni 32x20,5 *pies*.

Anche le absidi laterali seguono il medesimo principio proporzionale impiegato per l'abside centrale: la circonferenza che descrive il profilo esterno dell'abside minore è uguale alla circonferenza interna dell'abside maggiore; il profilo semicircolare interno dell'abside minore e il suo spessore murario sono determinati attraverso la costruzione di altri due cerchi concentrici secondo il metodo già descritto.

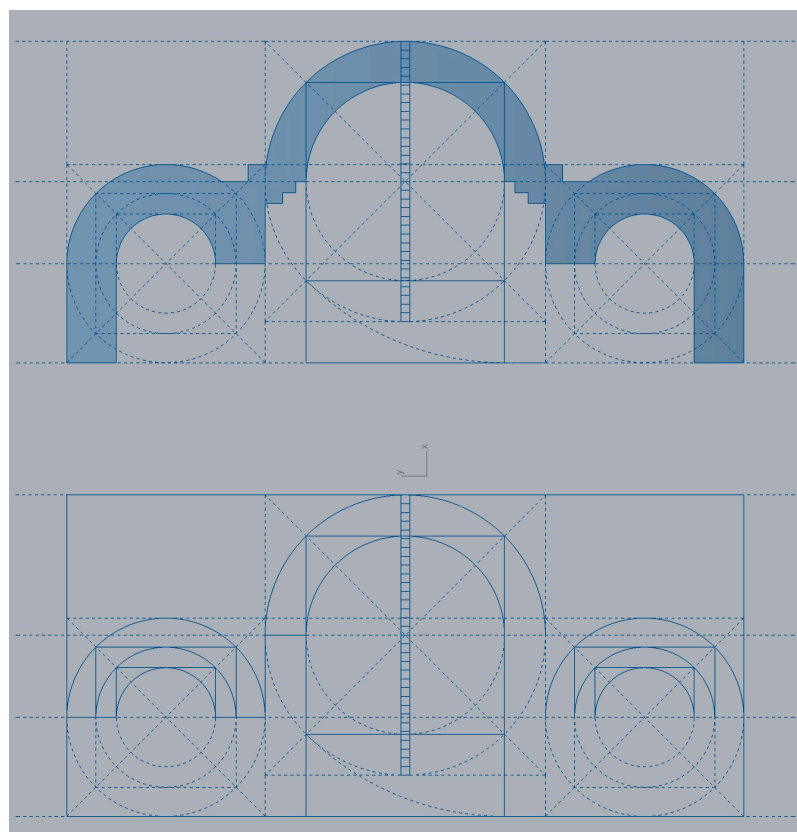


Figura 102, Salamanca, Catedral Vieja, ricostruzione del progetto per le absidi.

Diversi studiosi si sono espressi sulla configurazione della crociera e sul sistema di copertura, riportando talvolta inesattezze evidenti; Ricardo García Guereta, in un contributo del 1922, afferma che la crociera si imposta su un quadrato di lato pari a 7,80 metri (28 *pies*), misurato «entre los paramentos interiores de los arcos que le definen»⁴³²; più recentemente, la medesima dimensione è riportata da Valentín Berriochoa⁴³³ per definire il diametro interno del tamburo, forse sulla scorta dei dati forniti dallo stesso Guereta. Dalle indagini condotte sulla nuvola di punti è evidente che l'area della crociera si iscriva in un rettangolo di 30x32 *pies*, configurazione certamente insolita se riferita alla sezione circolare del tamburo, ma che probabilmente si deve all'intenzione iniziale di costruire una volta a crociera [fig. 103]. Sebbene minima in relazione all'intera fabbrica (poco meno di 60 centimetri), tale differenza altera la simmetria tra pilastri, archi e pennacchi, e costringe a numerose approssimazioni; a tali modifiche si aggiungono evidenti deformazioni delle strutture murarie, causate nel tempo dai carichi della cupola. I tre archi acuti che separano la crociera da abside, navata e braccio sud del transetto (rispettivamente est, ovest e sud) s'impostano a quota 40 *pies* dal piano di calpestio interno e hanno ampiezze differenti [fig. 104]: l'arco sud, aperto su uno dei lati maggiori della crociera, è ampio 27 *pies*; gli archi est e ovest, che si aprono sui lati minori della crociera, sono ampi 24 *pies*; tracciando le circonferenze che determinano il profilo acuto di tali archi si nota la configurazione visibilmente irregolare che assume l'arco orientale (tra crociera e abside), avente cuspide decentrata verso nord rispetto al suo asse. Tale irregolarità è l'effetto di assestamenti delle murature provocati dal peso delle strutture superiori; tali deformazioni richiedono opere di consolidamento che saranno poste in opera alla fine del XIV secolo⁴³⁴, le cui tracce sono tuttora visibili osservando l'arco nord della crociera; la configurazione di quest'ultimo, infatti, si distingue sensibilmente dal suo opposto [fig. 105]: in primo luogo, l'arco nord ha un'ampiezza inferiore ai 27 *pies* (l'ampiezza è pari a 22,5 *pies*) e s'imposta a una quota di 37 *pies* dal suolo, determinando, di conseguenza, sezioni murarie più ampie nei pilastri a nord e la riduzione della relativa luce sia in pianta che in alzato; sotto il profilo formale, inoltre, tale espediente costringe a interrompere la cornice d'imposta degli archi per mascherarne la discontinuità; la stessa sezione muraria dei pilastri viene modificata, assumendo una più semplice configurazione a base rettangolare. Da tali considerazioni è

possibile confermare che alla fine del XIV secolo, a causa dei cedimenti che interessarono i pennacchi e gli archi della crociera, veniva consolidato l'arco nord aumentandone la sezione muraria.

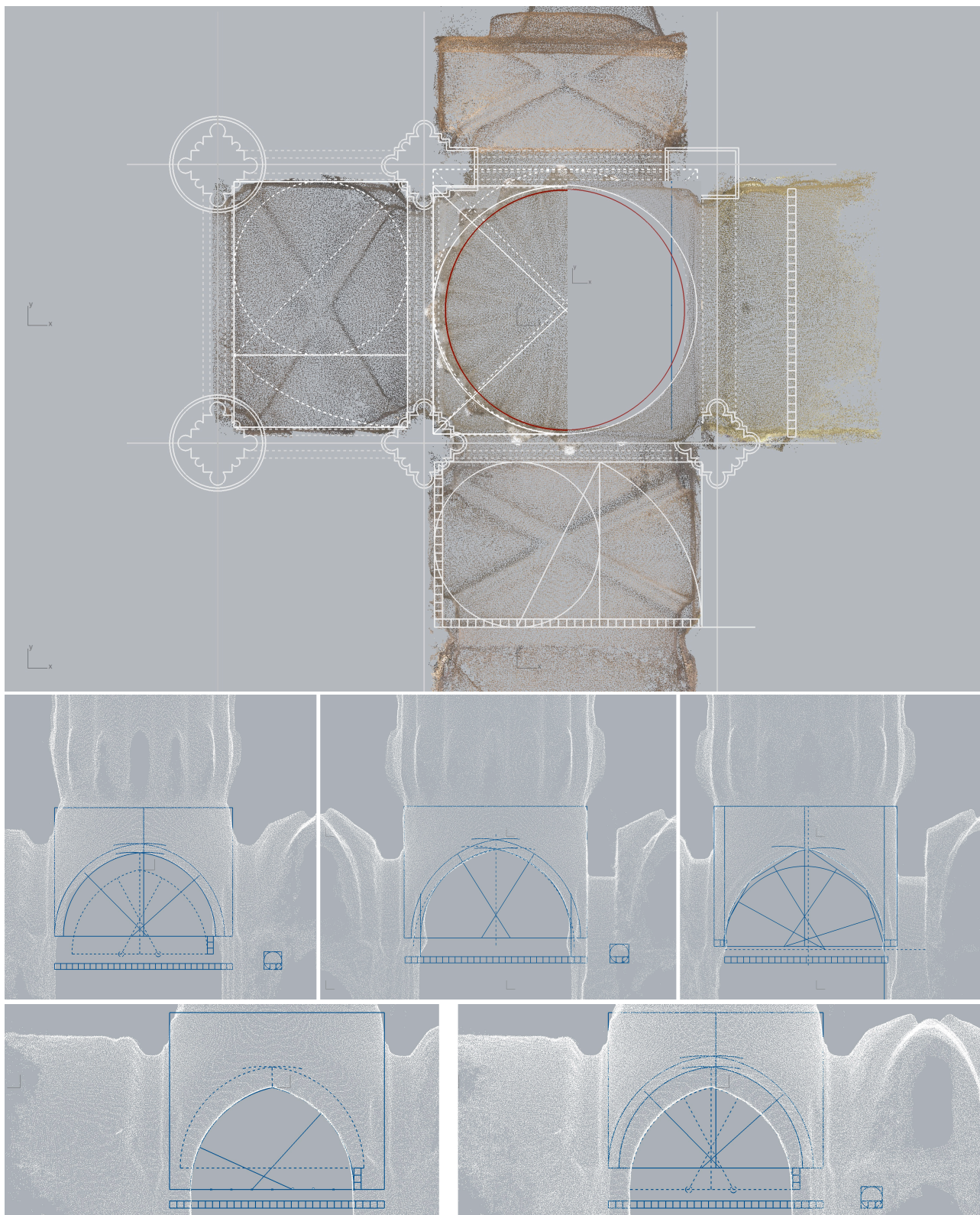


Figure 103, 104, 105, Salamanca, Catedral Vieja, a. configurazione geometrica della crociera e sezione sul tamburo; b. analisi degli archi (da sinistra) sud, ovest, est; in tratteggio gli archi opposti; c. l'arco nord della crociera isolato e posto a confronto con l'arco opposto.

L'impianto rettangolare della crociera costringe ad adattare anche la geometria dei pennacchi, che vengono realizzati sovrapponendo filari di conci che descrivono ellissi concentriche. L'ellisse di partenza è inscritta nel rettangolo della crociera, mentre l'ultima ellisse, passante per le cuspidi degli archi acuti, si raccorda al foro circolare di diametro 29 *pies*, attraverso una superficie irregolare di collegamento alta 5 *pies*.

Il tamburo si imposta alla quota di 63 *pies* dal calpestio interno e ha un profilo planimetrico mistilineo, inscrivibile in una circonferenza di diametro 41 *pies*; esso è scandito da una sequenza di colonnine addossate al paramento murario che restituiscono una complessa configurazione polilobata; all'interno, una circonferenza di 32 *pies* di diametro descrive il profilo murario sul quale si addossano le colonne di aggetto maggiore. L'apparecchio murario del tamburo riprende lo schema compositivo di Zamora, introducendo variazioni che rendono necessarie alcune approssimazioni nello schema geometrico; in primo luogo è stato riscontrato il disallineamento tra le colonne del paramento interno, che mantengono un passo pressoché uniforme, e quelle esterne, il cui passo varia adattandosi alle dimensioni dei torrini e delle altre strutture addossate al tamburo; queste e altre variazioni⁴³⁵ sono presumibilmente dovute a imprecisioni costruttive più che a singolari scelte di progetto; variabili sono anche gli aggetti delle colonne esterne, che determinano l'aumento della sezione resistente in prossimità dei nodi strutturali e l'alleggerimento delle masse murarie nelle porzioni meno significative.

L'intera composizione [fig. 106] ruota intorno a un sottile anello in muratura, delimitato da due circonferenze concentriche di 36 e 33,5 *pies* di diametro (spessore murario 1,25 *pies*); la sezione muraria di tale anello aumenta sugli assi delle colonnine, raggiungendo lo spessore massimo di 5,25 *pies*; sopra la quota degli archetti, la sezione minima del paramento murario ha spessore pari a 3 *pies* e mantiene l'ampiezza costante di 5,25 *pies* nell'area di massima estensione. Tali dimensioni, se confrontate con il diametro del tamburo, permettono di rintracciare i rapporti proporzionali che intercorrono tra le mense murarie e la luce coperta dalla cupola:

- a. alla quota delle colonnine del primo e del secondo ordine, lo spessore murario minimo è pari a 1,25 *pies*, ossia 1/20 del diametro della circonferenza interna;
- b. nel punto di massima estensione, lo spessore delle murature raggiunge dimensioni comprese tra 5,00 e 5,25 *pies*, che in relazione ai 41 *pies* del profilo esterno costituiscono valori prossimi all'ottava parte del diametro;
- c. la sezione muraria massima è pari a 1/6 della luce coperta dalla cupola (32 *pies*);
- d. lo spessore medio del paramento murario è pari a 3,25 *pies*, misura di poco superiore alla decima parte della luce da coprire (32 *pies*);
- e. sopra gli archetti del primo e secondo ordine, lo spessore murario minimo è pari mediamente a 3 *pies*, misura di poco inferiore alla decima parte della luce;
- f. la sezione muraria media sopra gli archetti è spessa 4,125 *pies*, dimensione prossima alla decima parte del diametro esterno del tamburo (41 *pies*);

Si desume che il dimensionamento delle sezioni murarie per la cupola di Salamanca è analogo a quello proposto per Zamora e si attesta su valori prossimi a 1/6 per il rapporto tra sezione massima e diametro interno, a 1/8 tra sezione massima e diametro esterno e a 1/10 tra sezione media e luce coperta.

Tamburo e torrini sono regolati da proporzioni che ne determinano il dimensionamento e le reciproche posizioni: il diametro del torrino, pari a 9 *pies*, è ottenuto dividendo in quattro parti il diametro della circonferenza esterna dell'anello sulla quale si aprono le finestre del tamburo (36 *pies* di diametro); sulle diagonali di un quadrato circoscritto a tale circonferenza si rintracciano i centri delle circonferenze dei torrini; tali cerchi sono tangenti al tamburo nei punti di intersezione tra le diagonali del quadrato e la circonferenza di 36 *pies* [fig. 107]; tale dimensione è assimilabile a quella riportata in un eidotipo quotato, prodotto durante i restauri di inizio Novecento⁴³⁶.

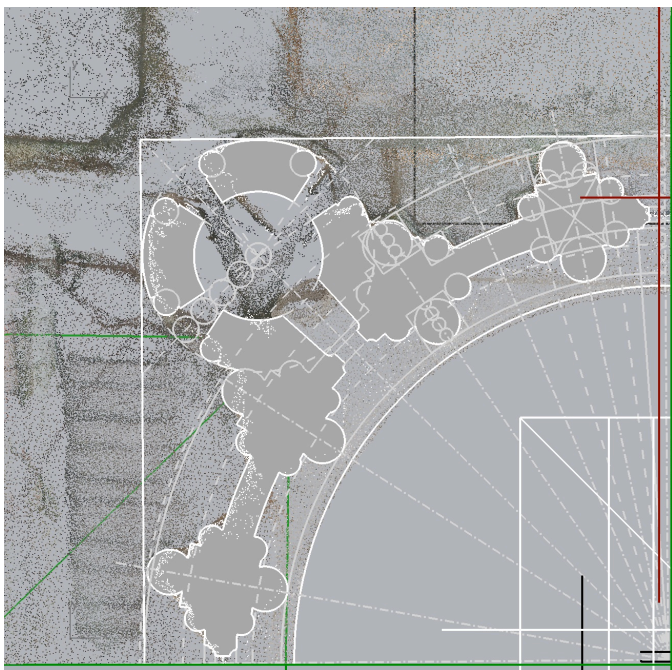


Figura 106, Salamanca, Catedral Vieja, matrici geometriche del tamburo alla quota delle colonne addossate; si noti il posizionamento del torrino, tangente al limite esterno dell'anello in pietra.



Figura 107; Salamanca, Catedral Vieja, matrici geometriche del tamburo alla quota degli archi; si noti la piastra muraria che ispessisce la sezione.

Per effetto di tali proporzioni, i torrini della cupola di Salamanca si innestano nella muratura frapposta alle colonne principali del tamburo e non direttamente su tali sostegni, che rimangono liberi e ben visibili ai fianchi di ciascun torrino; da ciò è evidente che il tema dei contrafforti angolari, pur rispondendo alle medesime logiche impiegate nel cantiere di Zamora, a Salamanca sia sviluppato interamente durante la fase progettuale e pertanto dimensioni e posizione dei torrini siano frutto di un tracciato geometrico omogeneo.

Resta ancora da chiarire se e come le variazioni introdotte a Salamanca alterino il comportamento statico della cupola rispetto allo schema di Zamora, nel quale i torrini, innestandosi direttamente sui sostegni del tamburo, contribuiscono a equilibrare i carichi della calotta provenienti dalle costole; a questo proposito, è utile notare che nella cupola di Salamanca, le colonne che fiancheggiano i torrini angolari proseguono quasi senza interruzioni lungo i due ordini del tamburo, differenziandosi così da ogni altra colonna addossata alla restante parte del paramento murario; in realtà, tali colonne sono poste alle estremità di un ampio setto murario dallo sviluppo circolare, concentrico alla circonferenza del tamburo e sul quale si innesta il torrino; tale ringrosso si prolunga oltre la cornice che delimita il tamburo, intercettando alla quota delle coperture le falde esterne di copertura [fig. 108]; tale espediente ha una duplice



Figura 108; Salamanca, Catedral Vieja, tamburo e cupola, dettaglio.

funzione: alla quota del tamburo consente di estendere la superficie di contatto con i torrini sino alle suddette colonne⁴³⁷ e al contempo di aumentarne la sezione muraria per conferire maggiore resistenza all'intero congegno; alla quota della calotta, il prolungamento di tale muratura consente di incrementare la resistenza della sezione alle reni. Sotto il profilo strutturale, il congegno così concepito può essere assimilato a quello proposto per Zamora e le dimensioni dell'intero sistema confortano tale ipotesi: lo sviluppo lineare del setto è pari a circa 10 *pies*, la medesima luce compresa tra i costoloni nella cupola di Zamora; lo spessore murario varia tra 5,25 *pies* (in asse con le colonne interne) e 3,75 *pies* (sezione muraria minima); la dimensione massima dell'intero sistema a contrafforte (porzione di tamburo, setto circolare e torrino), misurata sulla diagonale che congiunge i centri del tamburo e del torrino, è pari a 10,25 *pies*, dimensione compatibile con l'omologa misurata a Zamora. In definitiva, lo schema proporzionale sotteso alla cupola di Salamanca è frutto di una prudente rielaborazione⁴³⁸ del modello di Zamora, da cui viene dedotto il dimensionamento di massima, adattando le dimensioni dei singoli elementi architettonici per conseguire esiti formali più ricercati. La fronte architettonica del tamburo, inscritta in un rettangolo di 41x31 *pies*, è scandita in due ordini sovrapposti e tre partiture verticali; in proiezione ortografica, il ritmo scandito da ciascuna partitura verticale produce una sequenza di moduli così articolata: due moduli da 9 *pies* descrivono l'ampiezza dei torrini; due moduli da 2 *pies* descrivono l'ampiezza delle colonne tra i torrini e il tamburo; un modulo centrale di 19 *pies* descrive l'ampiezza della porzione visibile del tamburo. Sebbene in un primo tempo si sia tentato di ricondurre l'intera composizione a un unico modulo, sembrerebbe che i rapporti armonici impiegati nel progetto della fronte e dei suoi elementi architettonici rispondano alla combinazione di due moduli distinti, 10 e 19 *pies*, che per la loro prossimità potrebbero condurre a errori e ambiguità interpretative; nessuno dei due moduli, infatti, è strettamente sufficiente a descrivere l'intero dimensionamento del tamburo: lo scarto di 0,5 *pies* tra il primo modulo e la metà del secondo, che se espressa in *pies* appare irrilevante, assume una dimensione considerevole se trasposta in metri (equivale a circa 14 centimetri) e conduce a scarti ancor più ampi con l'uso dei rispettivi multipli; d'altra parte, il tentativo di forzare l'interpretazione delle matrici proporzionali per una più confortante lettura del progetto avrebbe restituito deviazioni non riconducibili alle consuete approssimazioni di cantiere. Sulla scorta di tali considerazioni sono state rintracciate le seguenti matrici geometriche [fig. 109]:

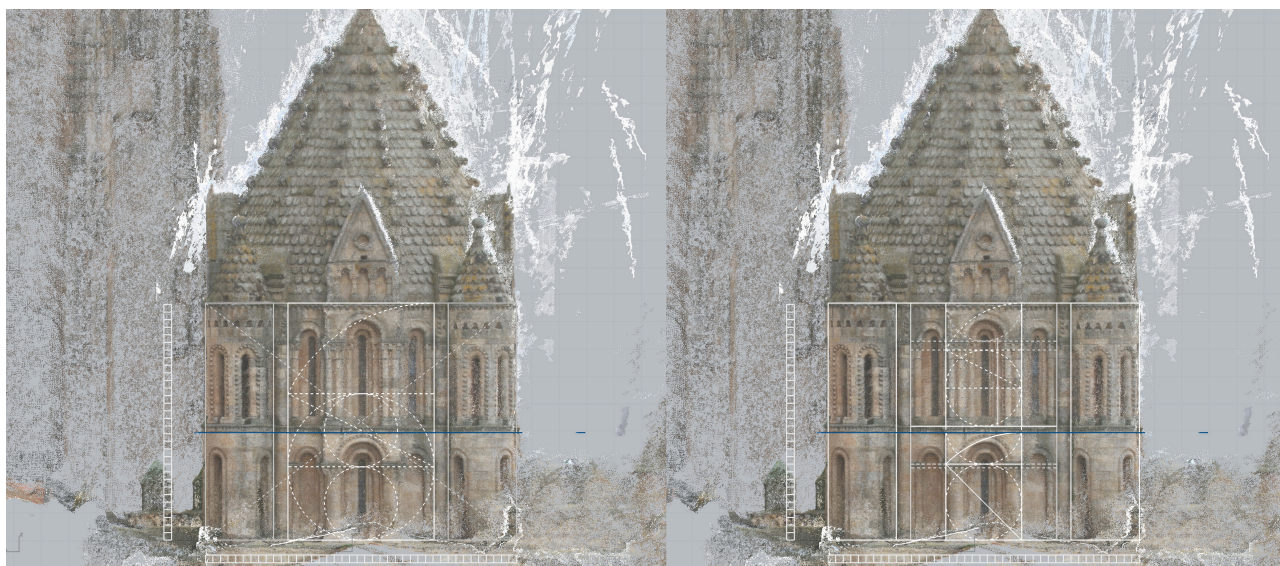


Figura 109, Salamanca, Catedral Vieja, schema di dimensionamento per l'alzato del tamburo.

- l'altezza complessiva del tamburo è ottenuta costruendo un rettangolo aureo a partire dal modulo di 19 *pies*;
- la metà di tale modulo determina l'altezza delle colonne del primo ordine, misurata escludendo la cornice sopra i capitelli;

- c. nell'ordine inferiore del tamburo, un modulo di 10 *pies* determina la quota d'imposta degli archetti;
- d. costruendo un rettangolo diagonale sul quadrato di 10 *pies* si ricava il dimensionamento del frontespizio inferiore posto al centro dello spartito murario, misurato sino al margine inferiore della cornice che separa i due ordini;
- e. la misura di 1,5 moduli (15 *pies*) determina la quota d'imposta del secondo ordine;
- f. l'ordine superiore del frontespizio è inscritto in un rettangolo aureo avente lato minore di 10 *pies*; il lato maggiore, che rappresenta l'altezza del secondo ordine, è pari a 16 *pies*;
- g. ne consegue un ordine superiore più alto di 1 *pie* rispetto all'ordine inferiore; le colonne del secondo ordine vengono allungate di un *pie*, al fine di mantenere invariate le proporzioni dei rettangoli che riquadrano gli archi principali del frontespizio.

È interessante notare la sostanziale convergenza tra le dimensioni dei due frontespizi nelle cupole di Salamanca (10 *pies*) e Zamora (11 *pies*).

La cupola è formata da due calotte che presentano configurazioni distinte: la calotta interna è formata da sedici costole che si congiungono in chiave e sostengono altrettante vele *gallonade*, secondo il modello di Zamora; la calotta esterna, che è stata profondamente alterata nel tempo, ha una configurazione ottenuta dall'alternanza di porzioni di cono e piani triangolari che si dispongono a raggiera; tale configurazione sembra essere frutto dei restauri di inizio Novecento e nulla sappiamo oggi circa la sua originaria forma; in attesa di una risolutiva prova documentaria si può supporre che la soluzione adottata originariamente emulasse la cupola di Zamora, forse superando le difficoltà costruttive del modello con l'impiego di un profilo a sesto acuto.

5.4.3 Toro⁴³⁹

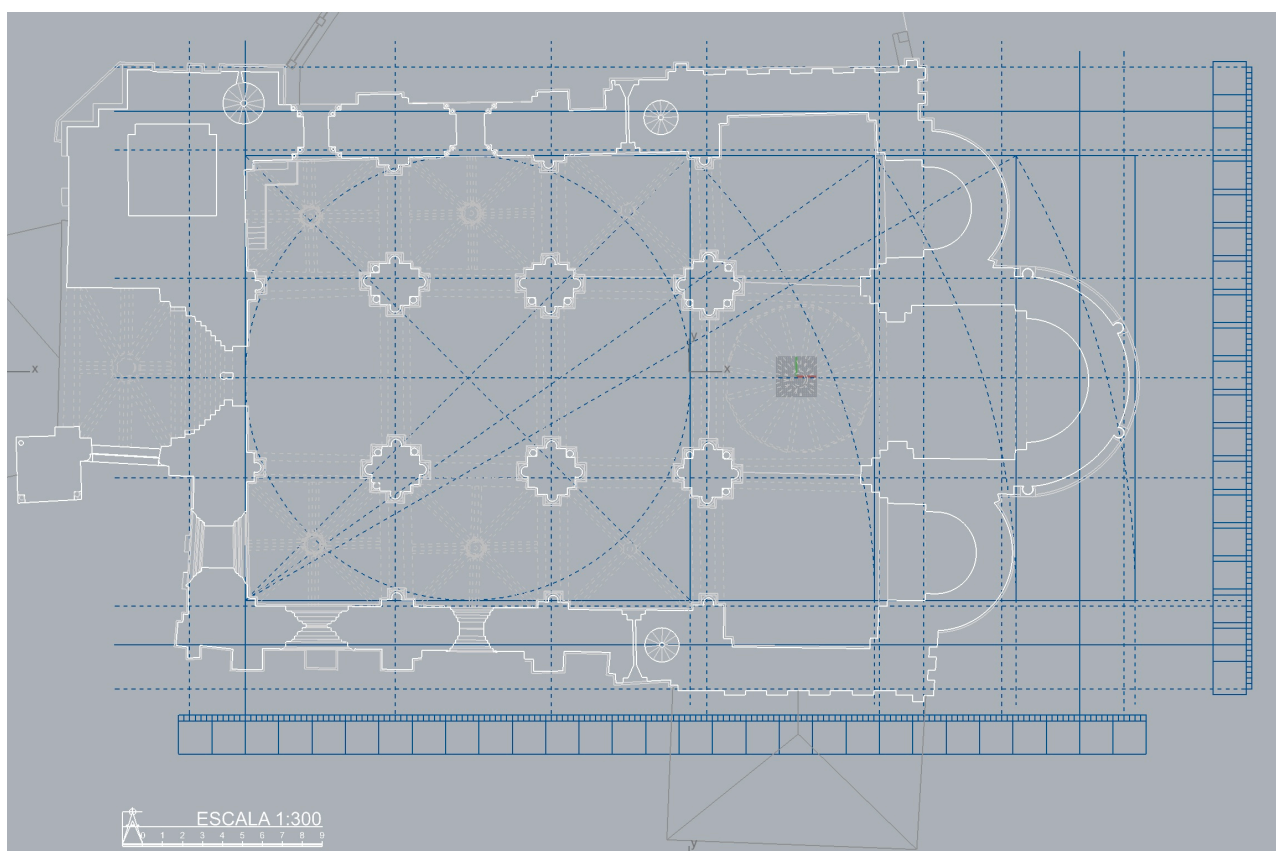


Figura 110, Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, ipotesi di dimensionamento per la pianta; scala in *pies*.

Pianta e alzato della collegiata di Toro sono inscrivibili in due rettangoli di 150x96 *pies*, misurati escludendo gli spessori murari; la pianta è regolata dalla combinazione di figure geometriche semplici come il quadrato, il triangolo e il cerchio, secondo una tradizione ampiamente consolidata; il rapporto tra le parti della fabbrica viene determinato attraverso l'uso di rapporti armonici comuni, come il rettangolo diagonale e, più in generale, attraverso un sapiente gioco di ribaltamenti delle diagonali.

Il corpo basilicale è inscrivibile in un quadrato di 80 *pies* di lato, che costituisce il modulo per il dimensionamento dell'intero complesso: costruendo un rettangolo diagonale sul quadrato iniziale si determina l'ampiezza del transetto come differenza tra i due lati del rettangolo; ribaltando sul lato maggiore la diagonale di tale primo rettangolo si ricava un nuovo rettangolo che iscrive la fabbrica sino al limite esterno delle absidi laterali; infine, ripetendo l'operazione sul nuovo rettangolo ottenuto si determina la dimensione longitudinale complessiva della fabbrica [fig. 110].

Il dimensionamento dei singoli spazi è affetto da imprecisioni imputabili al non corretto *emplazamiento*; le matrici proporzionali rintracciate, depurate da tali irregolarità ove possibile, sono le seguenti [fig. 111]:

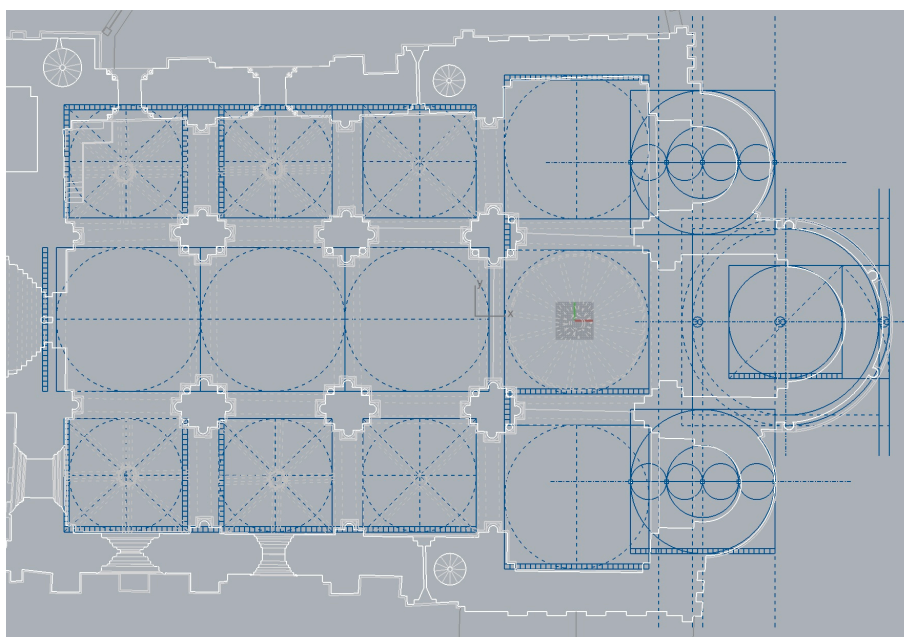


Figura 111 Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, matrici geometriche e proporzionali rintracciate nella pianta.

- a. La navata sud mantiene un'ampiezza pressoché costante, pari a 22 *pies*, mentre la navata nord ha ampiezza variabile tra 20 e 22 *pies*; nella loro configurazione ideale le campate laterali avrebbero assunto una configurazione quadrata, di luce netta pari a 22 *pies*; fanno eccezione le prime due campate a ovest, che vengono ulteriormente prolungate in direzione longitudinale (25x22).
- b. La navata centrale è inscrivibile in un rettangolo avente il lato maggiore pari a tre volte il minore (diapason diapente, dimensione 28x84 *pies*). A differenza delle altre fabbriche esaminate – nelle quali le campate laterali e quelle centrali instaurano rapporti proporzionali ben definiti – a Toro il dimensionamento della navata centrale enfatizza la percezione di un ambiente unico, abbandonando ogni rapporto proporzionale con le campate laterali; tale lettura sembra essere favorita anche della continuità della volta a sesto acuto, che copre la navata centrale ed è scandita esclusivamente dal ritmo degli archi diaframma.
- c. Lo spartito murario della navata è suddiviso in due ordini, distinti da una cornice continua posta a quota 38 *pies* dal calpestio interno; l'ordine inferiore è scandito da archi a sesto acuto che si

impostano alla quota di 25 *pies*; l'ordine superiore è privo di aperture e sul colmo della volta a sesto acuto raggiunge la quota complessiva di 56 *pies*.

- d. Transetto e crociera assumono una configurazione planimetrica rettangolare, determinata dalla sequenza di tre campate quadrate (28x28 *pies*), interrotte dagli archi acuti della crociera (spessore 6 *pies* ciascuno);
- e. La terminazione tri-absidata della *cabecera* è regolata da una combinazione di circonferenze che ripropone alcuni aspetti delle absidi di Salamanca, pur adottando un differente criterio di dimensionamento.

Il profilo dell'abside maggiore è determinato da tre semicirconferenze concentriche proporzionate tra loro: dal quadrato circoscritto alla semicirconferenza interna (raggio 11 *pies*⁴⁴⁰) si traccia l'arco che descrive il ribaltamento della diagonale sul lato maggiore; tale arco interseca l'asse longitudinale dell'abside in un punto, determinando il raggio della seconda circonferenza (18 *pies*); quest'ultima descrive il profilo esterno del catino sezionato alla quota del paramento murario superiore; infine, il lato maggiore del rettangolo diagonale determina il raggio della terza circonferenza (20 *pies*), che rappresenta l'ingombro massimo del catino, misurabile alla quota dello zoccolo.

Dal quadrato inscritto alla circonferenza interna dell'abside si ricava un rettangolo aureo (22x35,5 *pies*) [fig. 112]; il lato maggiore di tale rettangolo descrive la profondità massima del catino absidale e la distanza alla quale si innesta il corpo del transetto; da tale costruzione geometrica si ricavano anche le profondità delle cappelle che separano le absidi dal transetto: la profondità della campata centrale è pari alla somma del raggio della circonferenza interna (11 *pies*) e della porzione aurea del rettangolo precedentemente ottenuto (13,5 *pies*); la profondità delle cappelle laterali è ottenuta dalla differenza tra il lato maggiore del rettangolo aureo e il raggio della seconda circonferenza concentrica dell'abside maggiore. Anche il profilo delle due absidi laterali è definito da due circonferenze concentriche: la circonferenza esterna ha diametro pari a 28 *pies*; il diametro della circonferenza interna è pari alla metà del diametro maggiore; infine, il posizionamento di tali circonferenze avviene come in figura.

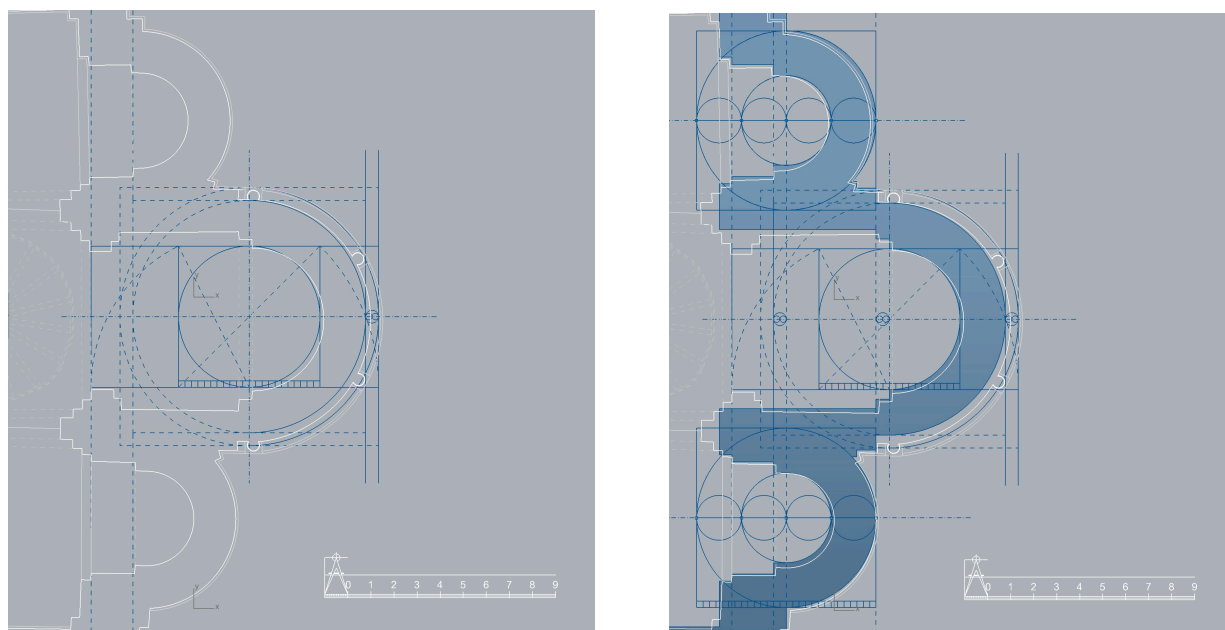


Figura 112; Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, ricostruzione del progetto per le absidi e relativo dimensionamento; il confronto con gli elaborati di rilievo permettono di evidenziare asimmetrie significative nell'abside nord.

Sui pilastri della crociera, alla quota di 38 *pies* dal suolo, si impostano gli archi a sesto acuto e i pennacchi; in tale congegno murario vengono riproposte le medesime proporzioni rintracciate nella crociera della cattedrale di Zamora⁴⁴¹, ma con un differente dimensionamento: l'altezza misurata dall'imposta degli archi all'imposta del tamburo, corrispondente ai $\frac{3}{4}$ del lato della crociera, è pari a 21 *pies*.

Il tamburo si imposta alla quota di 59 *pies* su uno zoccolo quadrato avente lato di 40 *pies*; il suo profilo icnografico poligonale si inscrive in una circonferenza avente diametro pari a circa 37 *pies*, e all'interno descrive un analogo profilo poligonale, circoscritto a una circonferenza di diametro pari a 31 *pies*; la sezione muraria si inspessisce in prossimità delle colonne disposte a raggiera, raggiungendo una dimensione massima di 5 *pies* (diametro massimo 39 *pies*) [fig. 113]. Tali dimensioni sono compatibili con le norme proporzionali sinora rintracciate nelle due precedenti fabbriche, fatta eccezione per il valore della sezione muraria minima, sensibilmente più ampia a Toro; pertanto, la sezione massima è assimilabile alle sesta parte del diametro interno e a $\frac{1}{8}$ del diametro esterno.

I torrini della collegiata di Toro hanno dimensioni distinte da quelli dei due precedenti modelli, ma rispondono a un analogo criterio proporzionale: i profili circolari dei torrini hanno diametro compreso fra i 7,5 e gli 8 *pies* e sono tangenti alla circonferenza che descrive il paramento murario esterno; in tal modo, lo spessore murario massimo (misurato sulla diagonale della crociera) è pari a 10,3 *pies*, che costituisce la terza parte della luce netta.

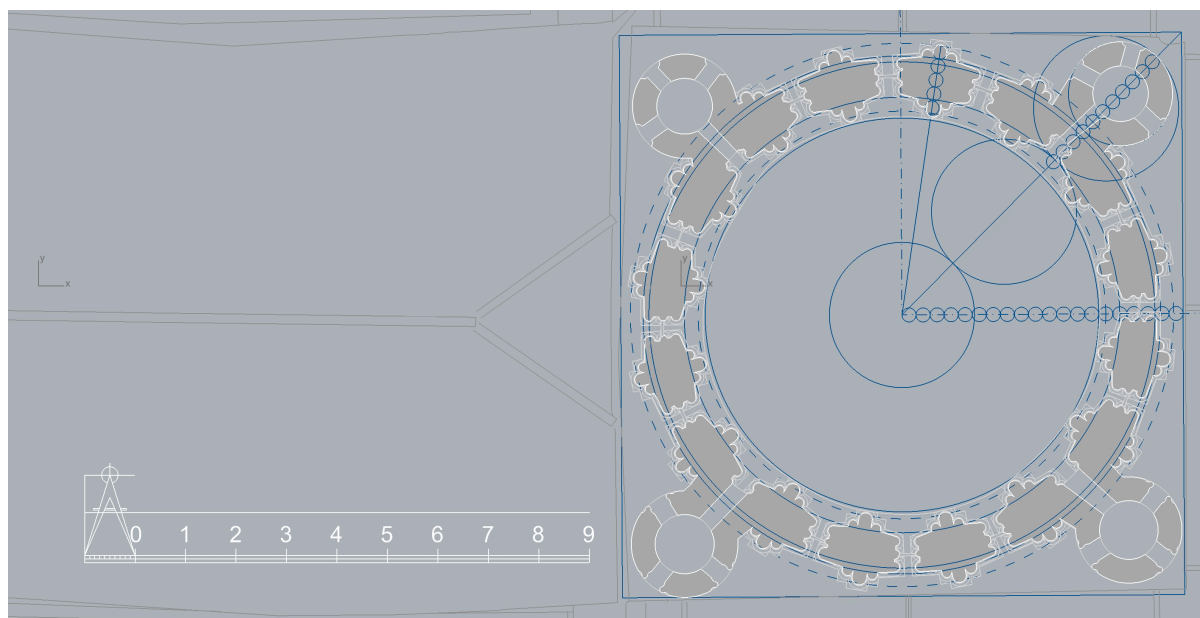


Figura 114; Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, schemi proporzionali e matrici geometriche nel tamburo.

Il dimensionamento dell'alzato del tamburo è regolato da un rettangolo diagonale avente lato minore pari a 28 *pies* (altezza del tamburo) e lato maggiore di 39 *pies*; il doppio ribaltamento della diagonale del quadrato permette di tracciare un nuovo quadrato avente lato di 39 *pies*, che individua un asse orizzontale posto a una quota di poco superiore a quella dell'intradosso della chiave della calotta; fonti documentarie attestano la presenza di un particolare intaglio della faccia di estradosso di tale chiave, presumibilmente eseguito come finitura terminale della calotta, che doveva pertanto rimanere visibile anche all'esterno. L'attuale copertura a tegole, come già ricordato, è da attribuire a un successivo intervento di restauro; è pertanto ipotizzabile che la quota dell'asse orizzontale generata dal ribaltamento della diagonale di cui sopra, corrispondesse con buona approssimazione alla quota terminale dell'estradosso della cupola, prima dei lavori di restauro. La figura 115 illustra la costruzione del rettangolo diagonale e il proporzionamento dei due ordini del tamburo.

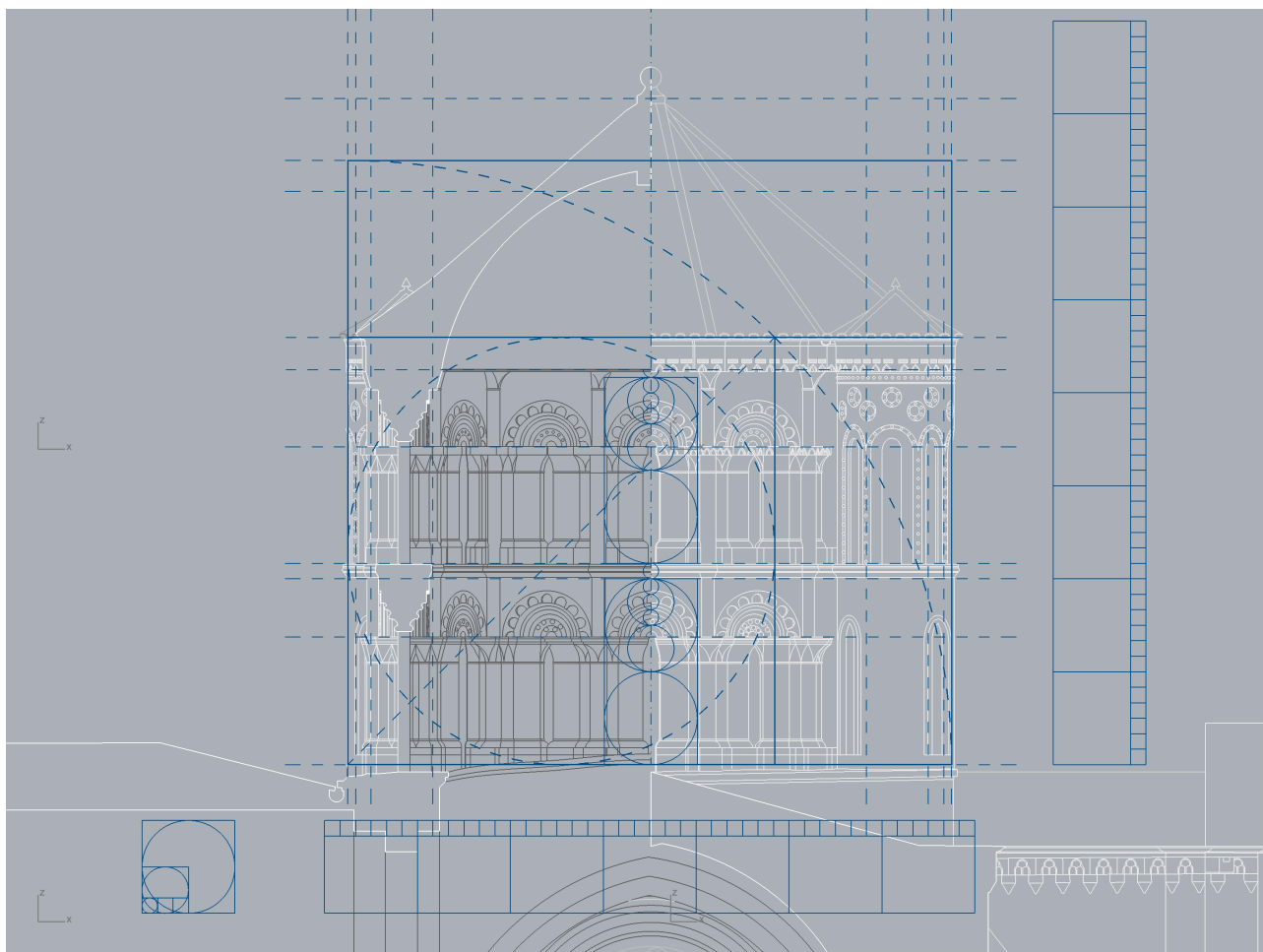


Figura 115, Toro, Colegiata de Santa María la Mayor, dimensionamento del tamburo e sue matrici proporzionali.

5.5 Indagini geometriche e ipotesi di progetto per le cupole di Licata e Trapani

5.5.1 Licata

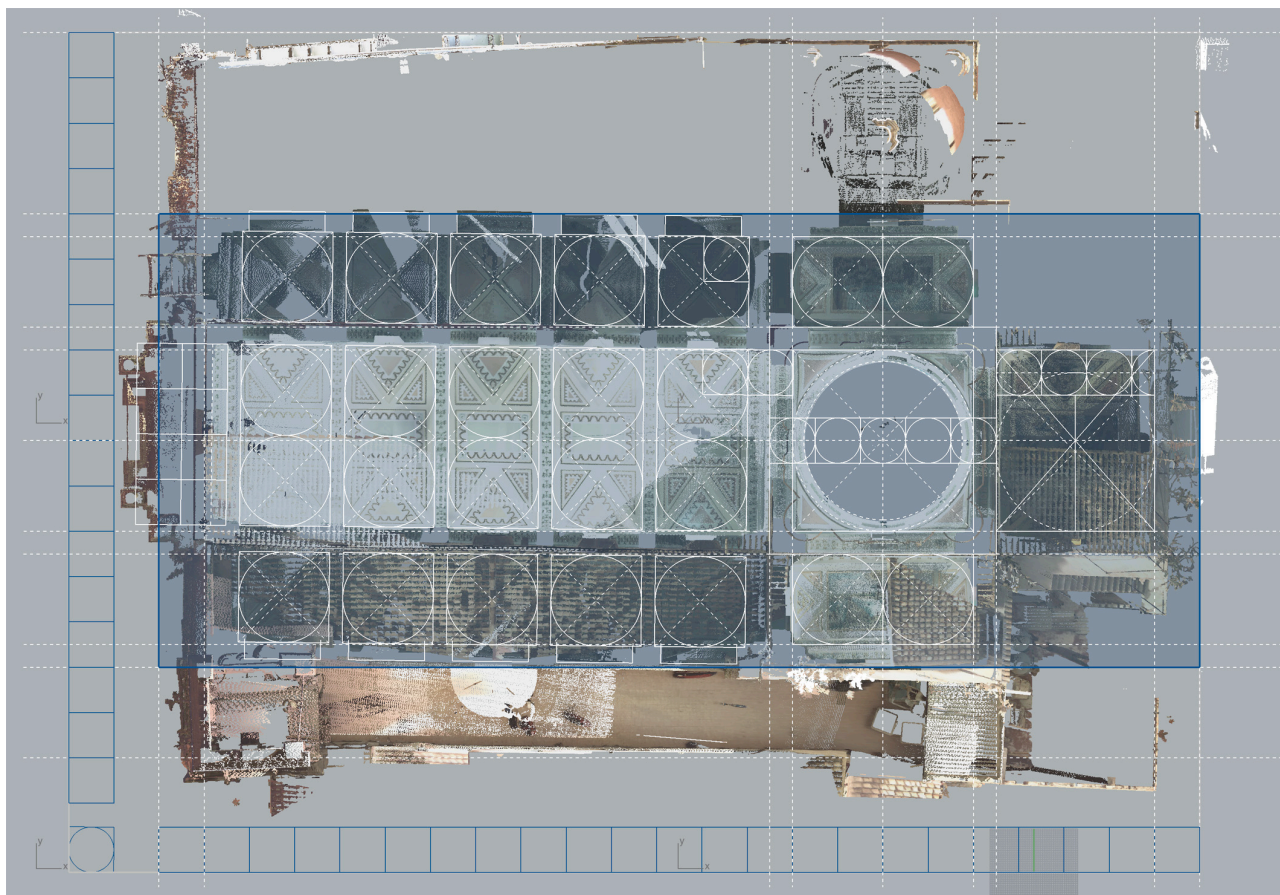


Figura 116; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, vista ortografica dall'alto della nuvola di punti e sovrapposizione dei tracciati geometrici individuati; scala in canne di Girgenti.

Dall'esame metrologico condotto sulla nuvola di punti acquisita a Licata emerge la sostanziale convergenza tra le dimensioni della fabbrica e i criteri di proporzionamento proposti nel trattato di Amico; è noto che l'*Architetto Pratico* sia stato pubblicato a distanza di un secolo dalla costruzione del Sant'Angelo, e l'ipotesi di un qualsivoglia parallelo potrebbe apparire quantomeno imprudente; tuttavia, è altrettanto noto che le norme riportate da Amico discendano da una consolidata mole di esperienze, riversata nella trattatistica precedente e certamente nota anche ai professionisti coinvolti nel cantiere di Licata; pertanto, non sembra improbabile che, prima di apparire nelle tavole sinottiche di Amico, tali criteri dimensionali abbiano potuto guidare l'attività professionale di molti altri architetti. A questo proposito si è ritenuto utile confrontare⁴⁴² le prescrizioni contenute nella già citata consulenza di Messineo (1656) e le *Tavole de' Sacri Tempj*⁴⁴³ proposte nel trattato di Amico, e infine valutare quanto la fabbrica si discosti da tali indicazioni.

Prima di esporre gli esiti di tale confronto è utile ricordare le precisazioni riguardanti il sistema di moduli adottato nelle tavole di Amico:

Per dare poi le misure cennate [delle parti principali d'essi Tempj], ci serviremo dello stesso metodo del primo libro, servendoci della scala de' moduli, parti, e minuti: dividendo prima ò la lunghezza, ovvero la larghezza del sito, che ci sarà destinato per piantare il Tempio, [...] in parti 23 eguali, ed una di queste sarà chiamato modulo, questo si dividerà in 10 parti eguali, che chiameremo ciascuna di queste, Parte; e questa finalmente si dividerà in parti 24 che chiameremo minuti.⁴⁴⁴

Secondo queste indicazioni il modulo prescelto dipenderebbe esclusivamente dalla scelta del sito, prescindendo dalle locali formulazioni delle unità di misura e rendendo condivisibili i criteri di dimensionamento. Come si evince dalla perizia, tale principio è impiegato anche da Messineo, che, a titolo esemplificativo, individua il modulo nell'ampiezza della nave principale, indicata con la locuzione «vano». A partire da tali considerazioni si è tentato di rintracciare nella fabbrica uno schema geometrico compatibile con tale impostazione metodologica.

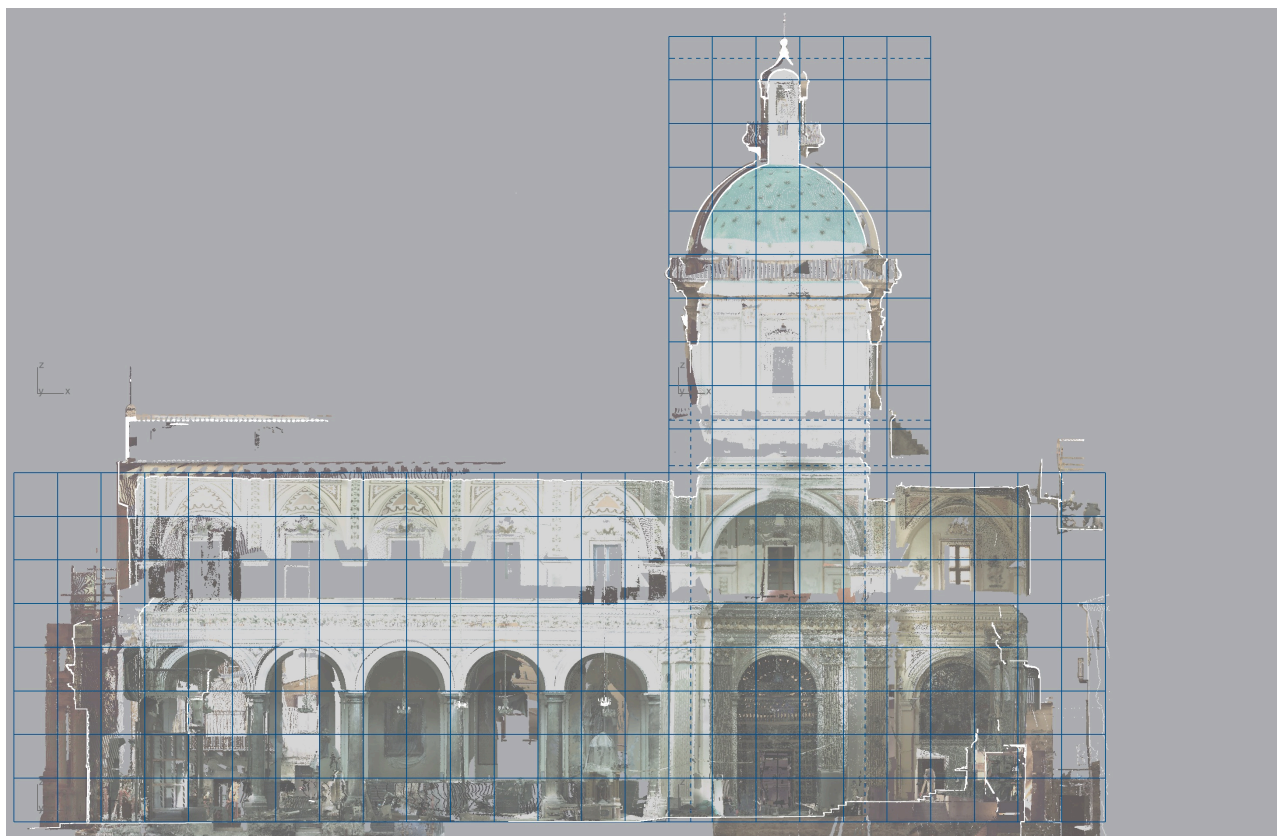


Figura 117; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, sezione longitudinale della nuvola di punti e dimensionamento di massima dell'alzato.

Per il dimensionamento della fabbrica di Licata è stato impiegato un modulo pari a una *canna di Girgenti*; la pianta è inscritta in un rettangolo di dimensioni 23x10 canne [fig.116], al netto di tolleranze imputabili alle vicende costruttive⁴⁴⁵, e anche l'alzato risponde alle medesime logiche dimensionali; l'altezza complessiva della fabbrica è pari a circa 17,5 canne, così scandite: l'altezza della navata principale, misurata dalla quota del calpestio alla quota dell'intradosso della volta, è pari a 8 canne, equivalenti agli 8 moduli indicati nel trattato di Amico⁴⁴⁶; i pennacchi, che raggiungono una quota di poco superiore, si raccordano al tamburo per mezzo di uno zoccolo estroflesso rispetto alle falde di copertura; ad una quota di circa 9 canne si impostano tamburo, cupola e lanterna, alti complessivamente 8,5 canne [fig. 117].

Le proporzioni degli spazi e delle partiture murarie sono così definite:

- a. la navata centrale, voltata con una botte lunettata, è inscritta in un rettangolo di dimensioni pari a 12,2x4 canne, misurate al netto degli spessori murari; nell'*Architetto Pratico*, Amico indica una dimensione longitudinale differente, pari a 13,5 moduli⁴⁴⁷, mentre rimane invariata la dimensione trasversale;
- b. nelle navate laterali, le campate hanno forma pressoché quadrata di lato pari a 2 canne e sono coperte da volte a crociera; ciascuna campata è separata da quella adiacente attraverso un arco a tutto sesto

avente diametro di 1 canna e $\frac{8}{10}$ e spessore pari a 2,5 palmi ($\frac{2}{10}$ di canna); tali dimensioni sono le medesime proposte da Amico;

- c. le cappelle delle navate laterali hanno dimensioni di 1 canna e $\frac{7}{10} \times \frac{4}{10}$ di canna; nel trattato le dimensioni delle cappelle sono sensibilmente differenti, ossia pari a 2x1 moduli;
- d. l'altezza della navata laterale è pari a 4 canne.
- e. lo spartito murario della navata centrale è scandito in due ordini, di cui il primo misura complessivamente 5 canne, il secondo è pari a 1 canna e le rimanenti 2 canne costituiscono l'altezza della volta a botte a partire dalla quota d'imposta [fig. 118]. Amico riporta dimensioni prossime ai valori precedenti, ma commette un errore nella trascrizione dell'altezza dell'ordine *bastardo*, quotato 3 moduli e 2 parti; se ottenuto come differenza tra l'altezza della navata principale e le rispettive porzioni, si ottiene il valore corretto di tale altezza, pari a 1 modulo e 2 parti⁴⁴⁸:

Altezza della nave fino alla volta	8 moduli		-
- Altezza del primo ordine	4 moduli	8 parti	-
- Altezza della Volta della Nave	2 moduli		=
Totale	1 modulo	2 parti	

Tali valori differiscono di soli $\frac{2}{10}$ di modulo da quanto riscontrato a Licata, misura che in confronto all'altezza complessiva della navata appare trascurabile.

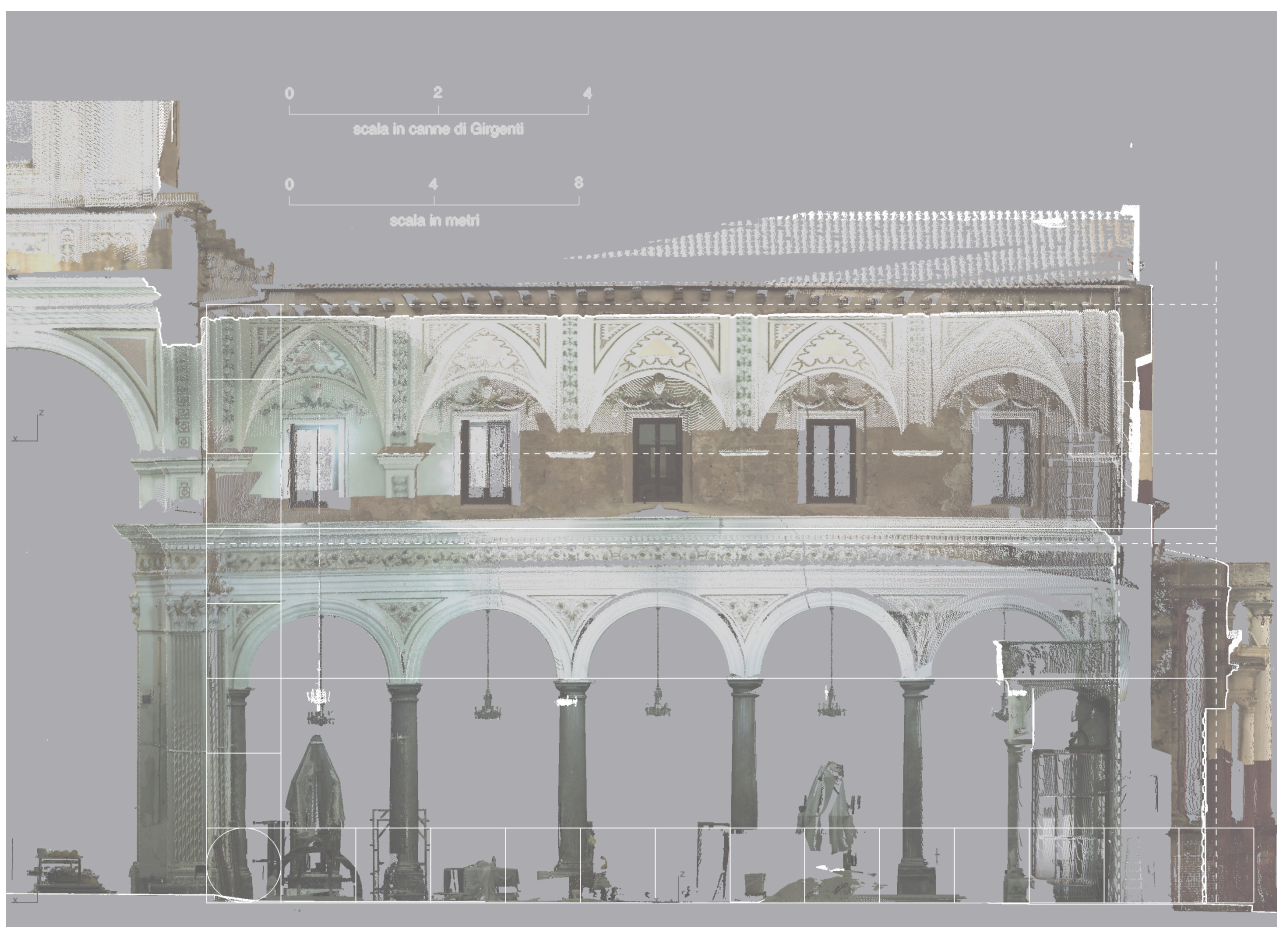


Figura 118; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, sezione longitudinale della nuvola di punti, dettaglio del corpo basilicale; in tratteggio le dimensioni indicate da Amico nel trattato; è chiaramente visibile la deformazione della cornice tra primo e secondo ordine e l'abbassamento della volta.

Passando a esaminare la perizia del 1656, è stato già ricordato che Messineo valuti come primo argomento la costruzione della cupola, prescrivendone forma e caratteri costruttivi⁴⁴⁹; successivamente si sofferma sull'altezza della navata maggiore, ritenendo accettabili le proporzioni adottate dal capomastro Bennici, ma suggerendo che, «se l'avanzasse l'altezza più delli dui vani sarria più conveniente e piacerebbe ad ogn'uno»⁴⁵⁰. L'appunto di Messineo sembra indicare che il primo progetto della fabbrica prevedesse un rapporto di 1:2 tra ampiezza e altezza della navata, rapporto che, come provato dalle indagini geometriche, verrà mantenuto invariato dal capomastro licatese (4 canne di larghezza e 8 canne di altezza), e che lo stesso Amico propone nelle sue tavole.

Messineo affronta poi la questione dei pilastri, affermando che un primo dimensionamento delle sezioni resistenti si ottiene dalla regola generale dell'epoca, che si basa su precise logiche prospettiche e prevede un ringrosso, rispetto al fusto della colonna, pari ad un decimo dell'ampiezza della navata centrale (che rispetto alle 4 canne di Licata risulterebbe pari a 4/10 di canna per lato); oltre tale dimensione infatti, lo sporto delle cornici d'imposta ridurrebbe oltremodo la visibilità della cupola. Da tale indicazione si deduce l'ampiezza ideale dell'arco della crociera, pari a 3 moduli e 2 parti. Nel caso in questione, Messineo propone una personale revisione alla regola, consistente nel diminuire ulteriormente gli aggetti dei pilastri della crociera in modo da ricavare un'ampiezza dell'arco superiore ai due moduli.

Sulle tavole di Amico, la dimensione dei pilastri della crociera non è direttamente riportata, ma può essere ricavata dalla differenza tra l'ampiezza della navata (4 moduli) e quella dell'arco maggiore (3 moduli e 6 parti)⁴⁵¹; tale differenza, che secondo Messineo non dovrebbe superare 4/10 di modulo per lato, è di 2/10 di modulo per lato; da tali considerazioni si deduce la disinvoltura di Amico nell'assottigliare ulteriormente la sezione dei pilastri della crociera (1/20 della luce della navata maggiore) a vantaggio delle connotazioni estetiche della fabbrica; inoltre, come egli stesso scrive, provvede a correggere i difetti visivi derivanti dall'aggetto delle cornici innalzando ulteriormente di 8 parti la quota d'imposta degli archi⁴⁵². La slanciata soluzione di Amico sembra costituire una rielaborazione personale rispetto alla regola dell'arte applicata a Licata, data la sostanziale convergenza tra le prime indicazioni di Messineo e quanto è stato concretamente realizzato [fig. 119].

L'ultima considerazione di Messineo riguarda la quota d'imposta degli archi posti tra il transetto e la navata laterale; è evidente che un errato dimensionamento di tali archi avrebbe potuto alterare l'armonia dell'intera composizione. Messineo propone che l'imposta di tali archi sia pari a quella degli archi della navata e in effetti tale soluzione, frutto di una prassi ampiamente consolidata, trova applicazione anche a Licata. Sebbene sulle tavole di Amico la quota d'imposta di tali archi non sia riportata, se ne può dedurre l'ampiezza esaminando le altre misure riportate:

Braccia del Titolo inclusi gli archi ⁴⁵³	3 moduli	
Groschezza degli archi maggiori che sostengono la cupola ⁴⁵⁴	0 moduli	5 parti
Larghezza dell'Ala ⁴⁵⁵ (navata minore)	2 moduli	
Larghezza degli Archi minori ⁴⁵⁶	1 modulo	8 parti

In tal modo si ricava la dimensione trasversale netta del braccio del transetto, pari a 2 moduli (3 – 0,5 – 0,5), che coincide con la larghezza della navata laterale; da ciò si può ipotizzare che l'ampiezza degli archi tra il transetto e la navata, nonché la loro quota d'imposta, siano equivalenti a quelle rilevabili nella navata laterale.

La perizia di Messineo non dà informazioni circa il dimensionamento delle altre parti della fabbrica, forse perché le opere sino a quel momento completate da Bennici erano ritenute di buona esecuzione.

I quattro pilastri angolari che sostengono la cupola descrivono planimetricamente due quadrati, uno per il profilo esterno della crociera e uno per quello interno, di lato pari rispettivamente a 5 canne e 4 canne; lo spessore dei sostegni è pari quindi a 4 palmi, valore equivalente alle 5 parti di modulo indicate da Amico⁴⁵⁷.

Gli archi a tutto sesto e i pennacchi sferici si impostano su un sovrassesto alto 8/10 di canna, che poggia a sua volta sui pilastri (altezza 5 canne); come detto, gli archi hanno diametro pari a 3 canne e 2/10, ma su di

essi si riscontrano lievi deformazioni che sembrano avere origini antiche, forse dovute alle prime fasi di assestamento della fabbrica; tali deformazioni producono un abbassamento del centro della semicirconfenza con conseguente spanciamento [fig. 120]; i sottostanti pilastri non risentono di tali deformazioni.

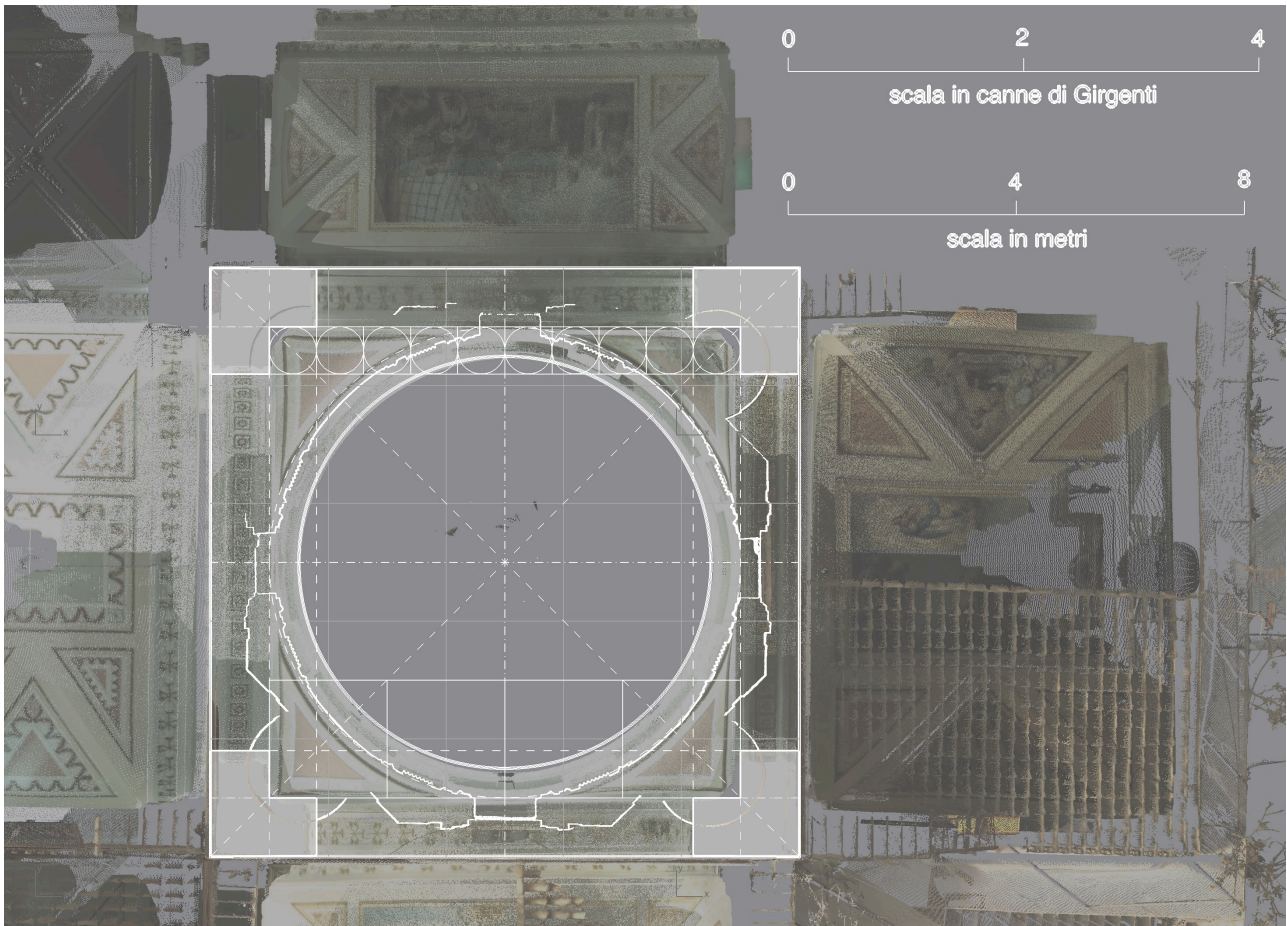


Figura 119; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, sezione orizzontale della nuvola alla quota del tamburo; prefigurazione del criterio di dimensionamento dei pilastri.

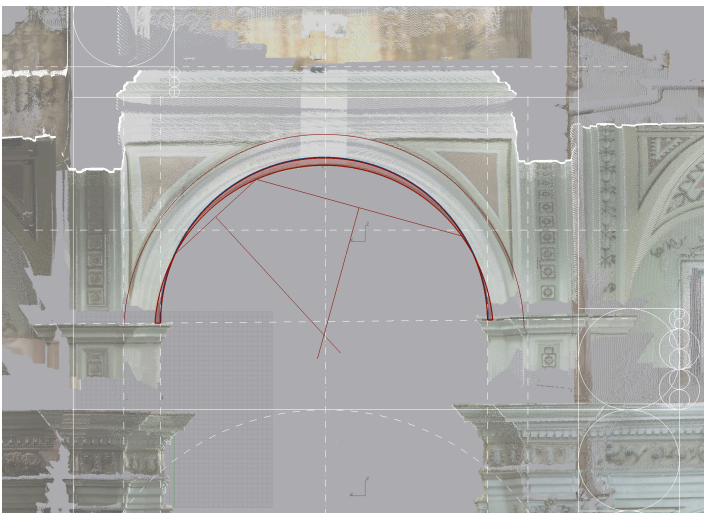


Figura 120; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, sezione longitudinale della nuvola di punti, dettaglio degli archi della crociera, in evidenza il meccanismo di deformazione dell'arco; a destra una vista iposcopica della cupola.

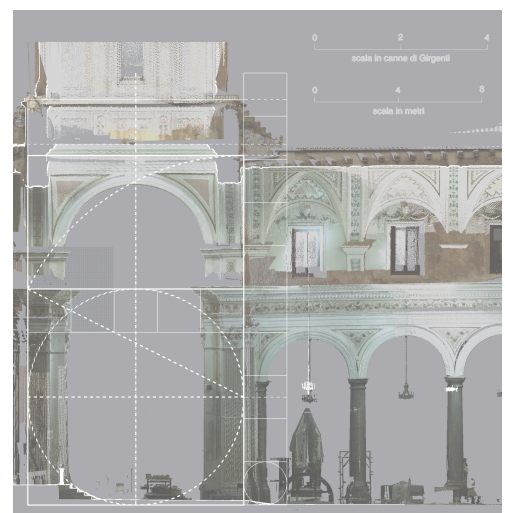


Figura 121; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, sezione longitudinale della nuvola, criterio di dimensionamento adottato per il sistema di sostegno della cupola

Il sistema strutturale di pilastri, archi e pennacchi può essere inscritto in un rettangolo aureo, costruito sul quadrato che determina l'ampiezza massima della crociera (lato 5 canne) [fig. 121]; alla quota di 8 canne e 1/10 (misura del lato maggiore del rettangolo aureo) si imposta un elemento di raccordo tra i pennacchi e il tamburo, di altezza pari a 1 canna e 3/10, avente sezione circolare all'interno e quadrata all'esterno. La configurazione planimetrica del tamburo è riconducibile alla composizione di figure geometriche semplici, come l'ottagono regolare e il cerchio, e può essere discretizzata come segue [fig. 122]:

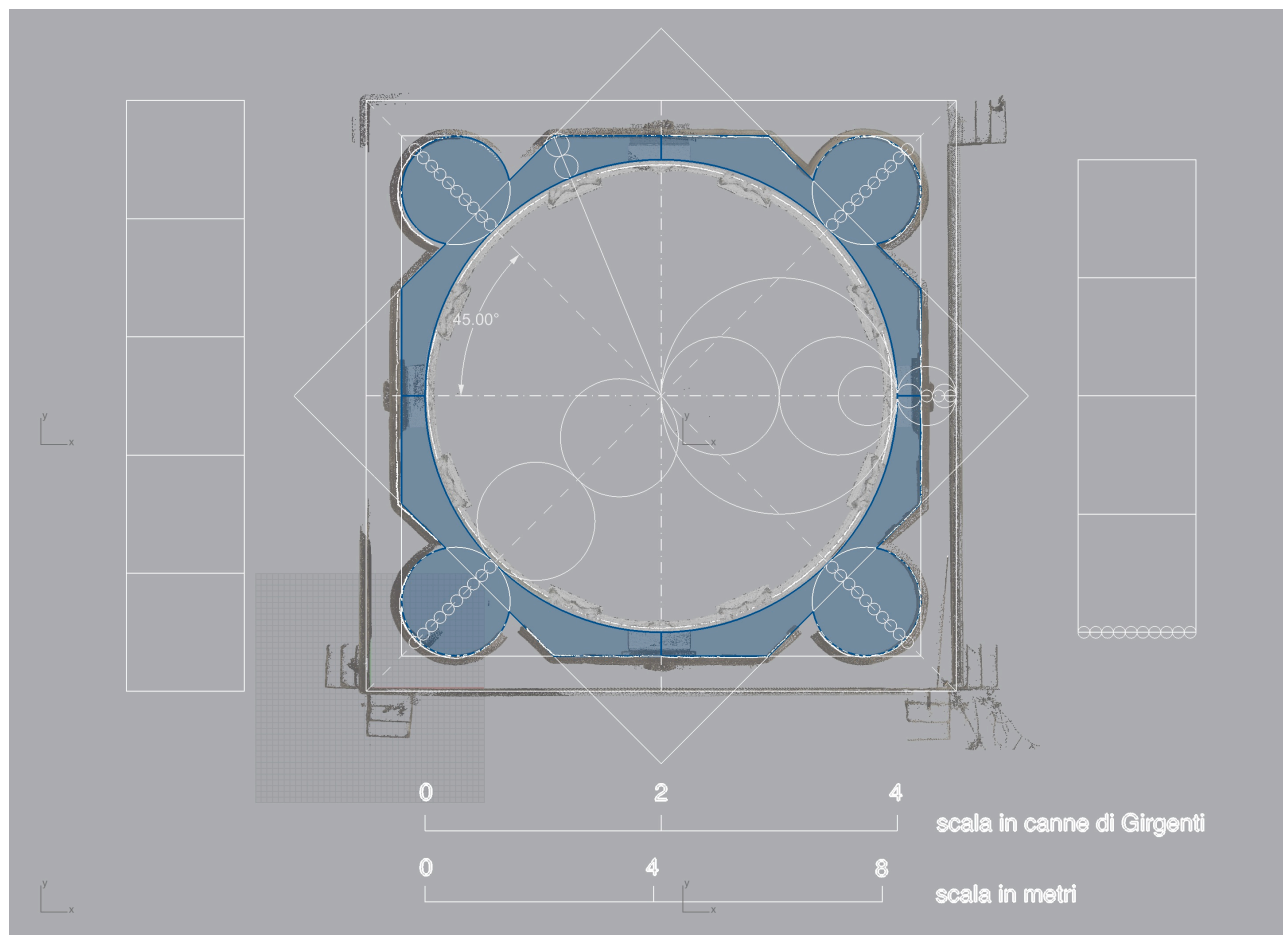
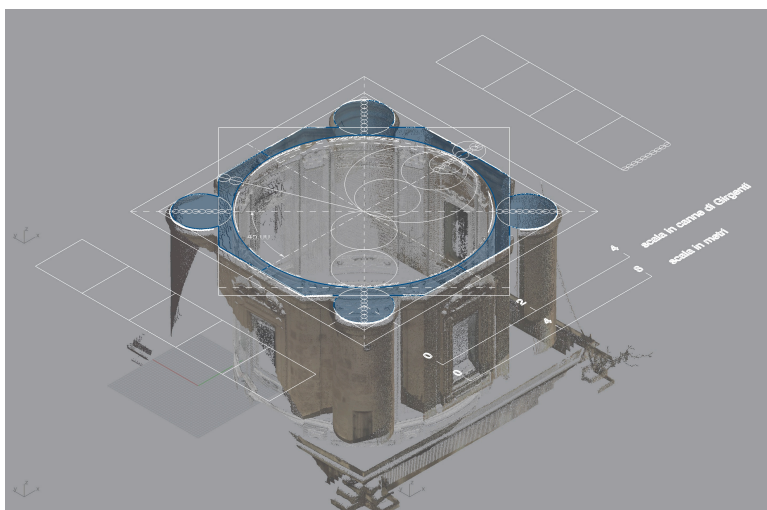


Figura 122; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, pianta e vista assonometrica del tamburo, con sovrapposizione dello schema geometrico individuato; si noti che il tamburo ha una configurazione pressoché perfetta sotto il profilo geometrico.

- la circonferenza che descrive la superficie interna del tamburo è inscritta al quadrato delimitato dai pilastri della crociera e ha quindi un diametro pari a 4 canne;
- l'ottagono è stato tracciato attraverso l'intersezione di due quadrati uguali, ruotati di 45 gradi l'uno rispetto all'altro e aventi lati di 4 canne e 4/10; dalla costruzione geometrica si evince la magistrale esecuzione dell'opera⁴⁵⁸;



- c. gli spessori murari assumono dimensione massima in prossimità dei vertici dell'ottagono ($4/10$ di modulo) e dimensione minima in prossimità del punto medio di ciascun lato ($2/10$ di modulo);
- d. sui lati obliqui dell'ottagono si innestano le circonferenze che delimitano il profilo esterno dei torrini; tali circonferenze sono costruite per mezzo di tre tangenti che descrivono un triangolo; la prima retta è la tangente alla circonferenza interna del tamburo, nel punto d'intersezione che questa produce con la diagonale della crociera; i lati del quadrato circoscritto al tamburo costituiscono le altre due tangenti; da tale costruzione si ottiene il diametro della circonferenza del torrino superiore ai $9/10$ di canna e approssimabile alla quarta parte del diametro interno del tamburo; il centro della circonferenza del torrino è sulla diagonale della crociera;
- e. le cornici d'imposta del tamburo determinano un profilo mistilineo con aggetti variabili tra $1/10$ e $2/10$ di canna; infine la superficie cilindrica del tamburo è ritmata da paraste scanalate disposte a raggiera, che individuano otto porzioni circolari.

L'interno e l'esterno del tamburo [fig. 123] hanno configurazioni distinte anche in alzato, impostandosi rispettivamente alle quote di 9,2 e 9,4 moduli; l'altezza dell'ordine interno è fissata ricostruendo la sezione aurea del diametro interno del tamburo, ricavando quindi un'altezza di 2 moduli e $4/10$; le cornici superiori hanno altezza pari a $8/10$ di modulo. All'esterno, l'altezza complessiva del tamburo è pari a 3 moduli e 4 parti, così distribuiti: 2 moduli e 2 parti misura l'altezza dall'imposta del tamburo al limite inferiore delle cornici; 8 parti misura l'altezza della cornice; 4 parti misura l'altezza dell'anello modanato che cinge il piede della cupola.

La calotta è formata da otto spicchi a sesto acuto aventi sezioni rastremate; per la determinazione del profilo rastremato sono stati tracciati i due archi di circonferenza, dopo averne rintracciato i centri; l'altezza complessiva della calotta interna è pari a 2 moduli e $7/10$, mentre la calotta esterna è alta 2 moduli e $3/10$. Infine è utile riportare la misura delle sezioni murarie massima e minima della calotta, pari rispettivamente a 2 parti di modulo e a 1,3 parti di modulo [fig. 124]. Sulla calotta si imposta la lanterna, che ha diametro interno pari a $8/10$ di canna e altezza di 2 canne e $1/10$.

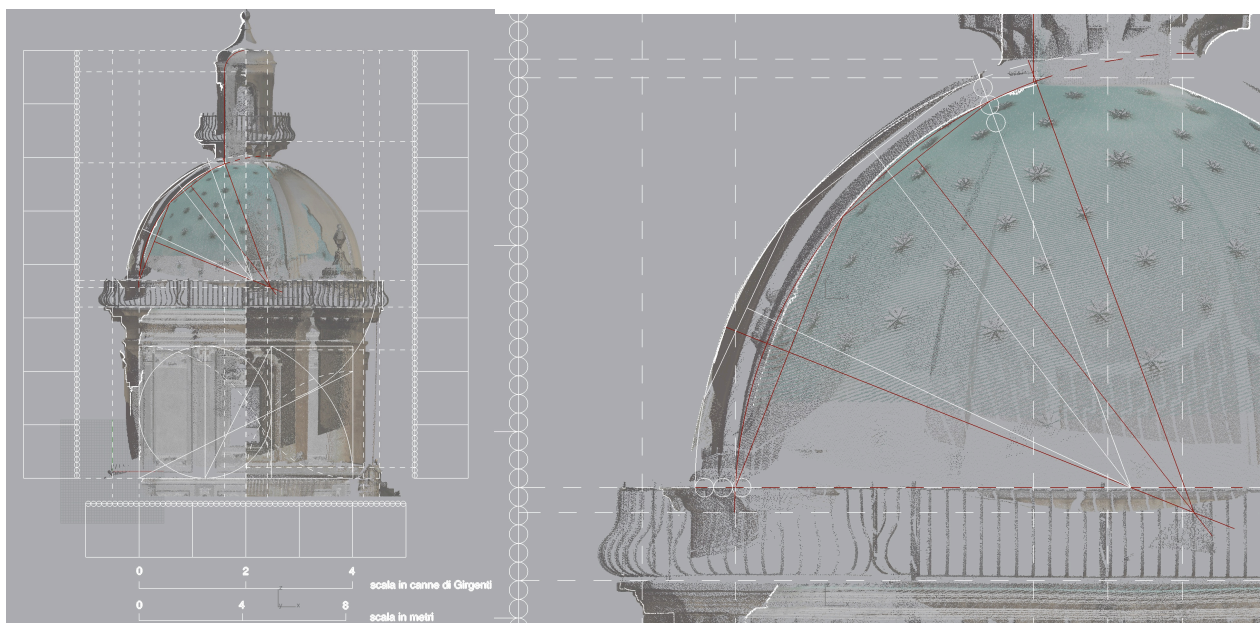


Figure 123-124; Licata (AG), chiesa di Sant'Angelo Martire, dimensionamento del tamburo.

La tipologia di cupola riportata nel trattato di Amico [fig. 125] è differente da quella proposta a Licata e Trapani, e pertanto un parallelo con tali strutture risulterebbe poco attendibile; tuttavia, se ci si sofferma su alcune indicazioni di massima, è possibile constatare alcune analogie tra gli schemi proporzionali. A titolo esemplificativo, si noti che il diametro interno della cupola proposta nel trattato è pari a 4 moduli, misura equivalente alla soluzione di Licata, e che dimensioni paragonabili a quelle di Licata sono proposte da Amico per l'altezza del tamburo (3 moduli e 4 parti) e della calotta (2 moduli e 5 parti), o ancora per il diametro interno della lanterna (8 parti).

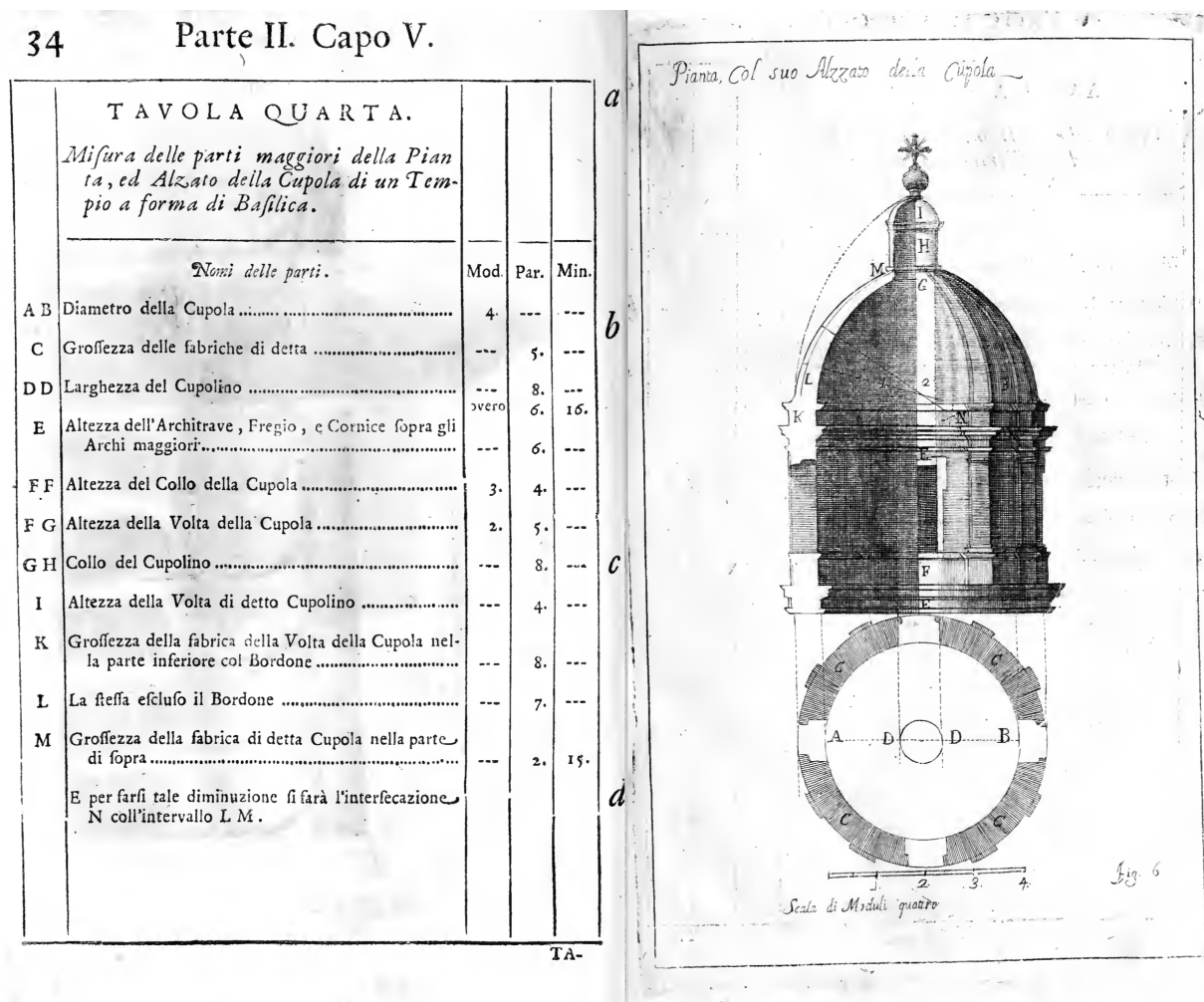


Figura 125; Giovanni Amico, Modello di cupola e relativo dimensionamento proposti nell'Architetto Pratico (AMICO 1750)

5.5.2 Trapani

La pianta del San Lorenzo ha una configurazione a trapezio irregolare, inscrivibile in un rettangolo che ha lato maggiore pari a circa 33 canne e lato minore di 13 canne. Sebbene dall'osservazione della pianta sia possibile intuire lo schema proporzionale che regola i rapporti tra le parti, il dimensionamento della fabbrica è difficilmente riconducibile alla canna di Palermo; un primo tentativo condotto sul modulo di una canna ha restituito esiti poco soddisfacenti sotto il profilo dimensionale, talvolta in netto contrasto con lo stesso schema geometrico; a titolo esemplificativo, si noti che la crociera ha una pianta quadrata, di lato pari a circa 11,51 metri; tale dimensione, se espressa in canne, equivale a poco meno di 5 canne, 5 palmi e 9 oncie (valore prossimo a 5 canne e 7/10). Un secondo infruttuoso tentativo è stato eseguito con la canna di Messina⁴⁵⁹, il cui impiego nel cantiere si sarebbe potuto ricondurre alla presenza del messinese Bonaventura Certo, primo progettista della nuova fabbrica; tuttavia la rinuncia all'impiego della canna di Palermo appare

del tutto improbabile, specie considerando la difficoltà nella lettura del progetto tra le maestranze locali, le conseguenti ripercussioni sull'andamento del cantiere e la necessità di laboriose conversioni tra unità di misura. Tali considerazioni hanno suggerito un diverso approccio all'indagine dimensionale, che, partendo dalla definizione del sistema proporzionale della fabbrica, conducesse alla determinazione del suo modulo. L'ipotesi avanzata in questa sede è che gli interventi di Amico per il San Lorenzo siano conformi ai criteri progettuali proposti alcuni anni dopo nel suo trattato⁴⁶⁰, e che pertanto siano stati definiti dopo aver rintracciato lo schema proporzionale sotteso alla fabbrica; affidiamo i nostri ragionamenti alle parole dell'architetto trapanese:

Devono dunque le parti d'una Chiesa ben ideata, esser di modo proporzionate coll'altre, che corrispondano a qualche proporzione armonica; acciò facesse ancora all'occhio grata armonia. Quale poi delle tante proporzioni armoniche debba adoperarsi in questa, ò quell'altra parte del Tempio, non è cosa di cui possa darsi regole generali; ma solo questo dipende dal buon gusto dell'Architetto (...). Questo buon gusto però nell'Architetto s'anderà acquistando colla pratica, e con l'osservazione d'altri Tempj ben architettati.⁴⁶¹

Se tale ipotesi fosse confermata, si potrebbero stabilire quali affinità e quali elementi di discontinuità si celino tra gli interventi dei due principali progettisti del San Lorenzo e come le scelte del primo abbiano condizionato l'attività del secondo.

L'indagine geometrica ha assunto come presupposto iniziale l'uso di un modulo ricavato dall'ampiezza della navata centrale, alla quale dovrebbe riferirsi il progetto elaborato da Bonaventura Certo; sulla scorta delle indicazioni di Amico e degli esiti dell'indagine condotta a Licata, la dimensione della navata è stata suddivisa in quattro parti, ottenendo un'ampiezza di circa 232 centimetri, equivalenti a 9 palmi. La dimensione complessiva della fabbrica, se espressa in tale unità di misura, è pari a 29x11,5 moduli, valori ancora poco significativi, ma evidentemente dovuti all'irregolarità dell'impianto trapezio; con il medesimo modulo si è tentato di rintracciare uno schema proporzionale tra le parti della fabbrica, ottenendo finalmente esiti confortanti [fig. 126]:

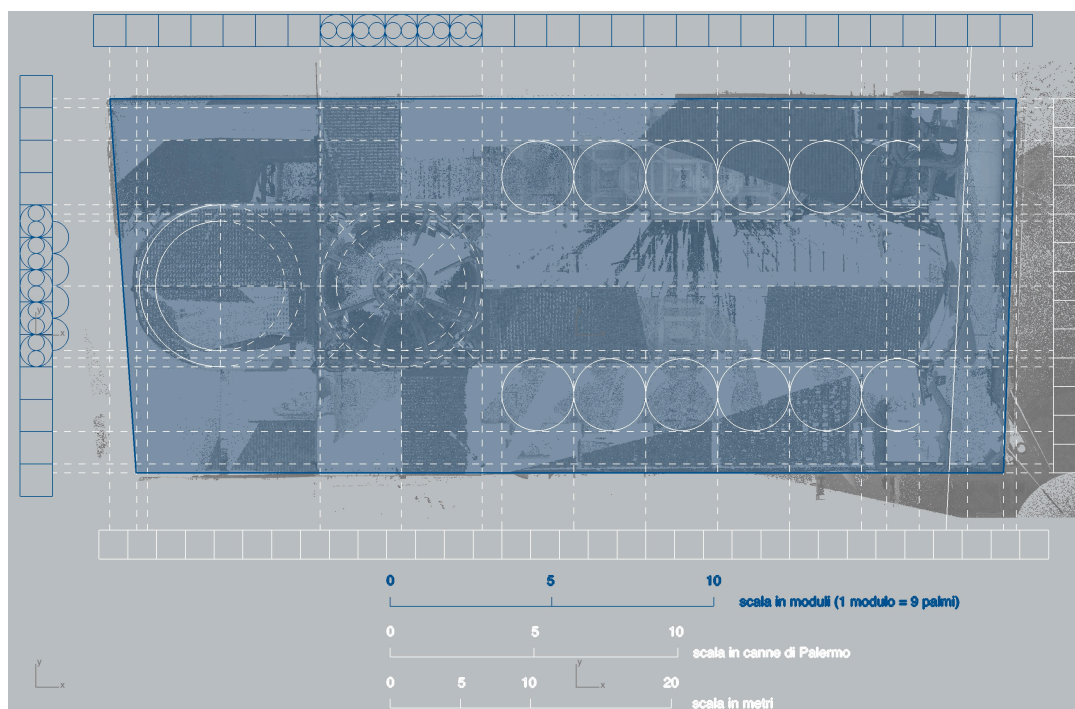


Figura 126; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, vista ortografica della nuvola e sovrapposizione dello schema geometrico individuato. Modulo di 9 *pialmi* di Palermo (blu) e di una canna (bianco).

- a. la navata centrale è inscritta in un rettangolo di 13,5x4 moduli, misurati al netto degli spessori murari, considerando il margine interno della facciata seicentesca; la medesima proporzione è riproposta nel trattato di Amico;
- b. il profilo della crociera è descritto da due quadrati concentrici aventi lati pari a 4 moduli (per analogia con la dimensione della navata) e 5 moduli;
- c. la luce trasversale della fabbrica è pari a 11 moduli, ottenuti includendo le cappelle laterali progettate da Amico⁴⁶², che hanno profondità pari a 1 modulo; si deduce anche la misura della fabbrica prima di tali interventi, pari a 9 moduli;
- d. le campate del transetto hanno dimensione pari a 3x5 moduli;
- e. il catino absidale è inscritto in una semicirconferenza avente diametro di 5 moduli;

In merito alle proporzioni delle campate laterali e della navata centrale sono necessarie alcune precisazioni; la distanza tra gli assi delle colonne della navata è pari a circa 2 canne e 4 palmi, misura che ha fuorviato sin dalle prime battute l'indagine geometrica; con l'impiego del modulo di 9 palmi, tale interasse è pari a 2 moduli e 2 parti; si noti che nel San Lorenzo, la lunghezza della navata è virtualmente ridotta per mezzo di un espediente costruttivo che lo stesso Amico espone in una delle sue tavole:

Si vede in un lato della presente Pianta, che gli Archi della Nave sono portati da Colonne, e perciò vi sono archi n. 6; il che non riesce con ordinanza, per non esservi l'arco di mezzo nella lunghezza della Nave, dovendo sempre gli Archi essere dispari; per il che si potrebbero distaccare le colonne dal suo pilastro, quantocchè fortificano gli Archi numero cinque.⁴⁶³

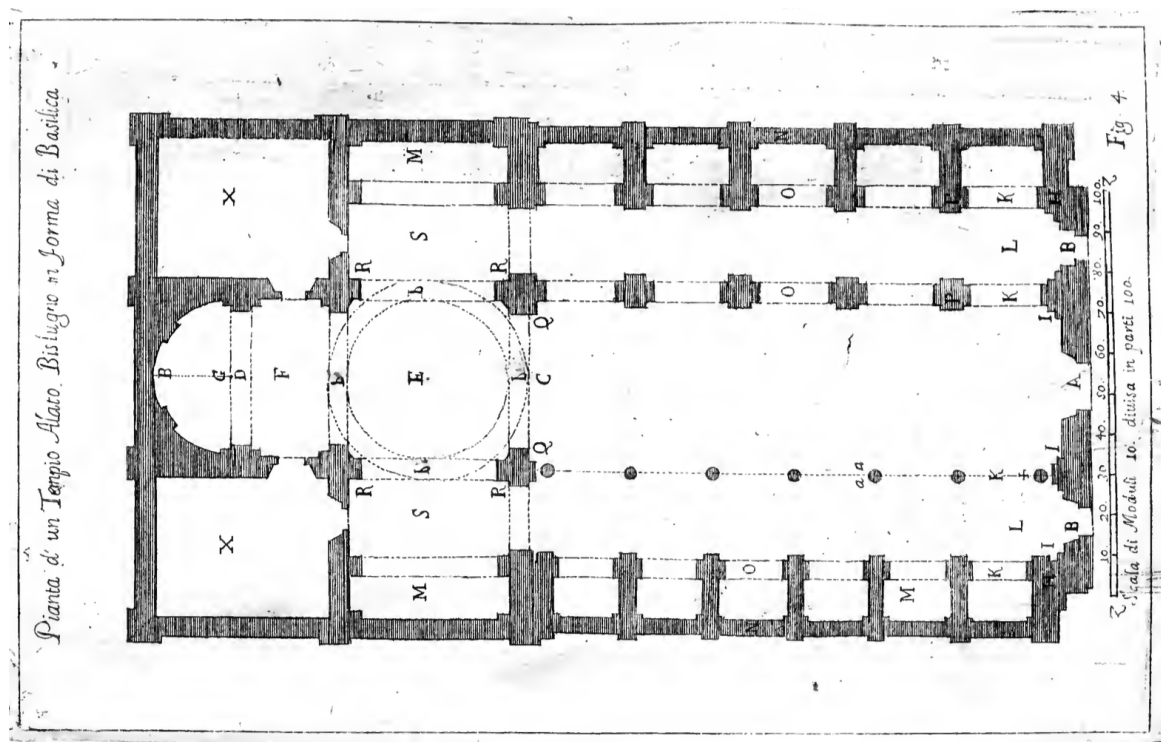


Figura 127; Giovanni Amico, modello di chiesa basilicale (AMICO 1750).

Più che un'imprecisione nella rappresentazione, Amico sembrerebbe voler segnalare un accorgimento per il corretto proporzionamento delle campate; la pianta raffigura due soluzioni per la navata [fig. 127], distinte in base alla tipologia di sostegno adottata: a destra sono rappresentate cinque arcate su pilastri; a sinistra, l'impiego delle più esili colonne costringe a suddividere la navata in sei arcate; un rapido sguardo alle dimensioni proposte da Amico ci consente di formulare alcune riflessioni: dividendo la lunghezza della navata (13,5 moduli) in 6 parti si ottiene un interasse di 2,25 moduli, da cui deriva l'ampiezza dell'arco proposta da Amico (1 modulo e 8 parti); impostando cinque archi sulla navata si otterrebbe un interasse di 2 moduli e 7 parti, ossia un diametro dell'arco pari a 2 moduli e 2 parti (spessore dei sostegni 5 parti), che costringerebbe ad alterare le proporzioni dello spartito murario della navata⁴⁶⁴ e stravolgere il sistema strutturale; si rammenti che il dimensionamento dei sostegni degli archi era determinato in proporzione alla corda tracciata sulla terza parte della semicirconferenza e pertanto ad archi maggiori corrisponderebbero sostegni maggiori, con la conseguenza di dover aumentare le sezioni dei fusti delle colonne; un intricato domino che avrebbe costretto a rimodulare le proporzioni di tutta la fabbrica. La soluzione di tale sistema è quella che viene applicata a Trapani [fig. 128] e in seguito proposta nel trattato di Amico.



Figura 128; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, viste della navata centrale; campo e controcampo.

Possibile che tale espediente sia stato riversato nelle pagine dell'Architetto Pratico a seguito dell'osservazione del San Lorenzo? certo è che la soluzione di Trapani faccia parte di un ampio e consolidato contesto locale⁴⁶⁵ che Amico conosce fin troppo bene, e la prossimità cronologica tra gli ultimi interventi nel cantiere di San Lorenzo e la gestazione del secondo volume del trattato potrebbero ispirare affascinanti suggestioni.

Tornando all'ampiezza delle campate laterali, si è già detto che misurando con il modulo di ampiezza pari a 9 palmi si ricava un interasse di 2 moduli e 2 parti [fig. 129], misura compatibile con l'interasse ricavato dal trattato e adeguatamente proporzionata alla sezione delle colonne del San Lorenzo; da ciò si deduce un'ulteriore conferma sull'affidabilità del nuovo modulo impiegato.

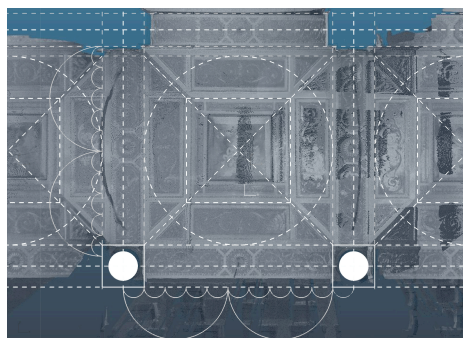


Figura 129; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, dimensionamento delle campate laterali.

Nell'alzato si rintracciano matrici proporzionali ancora una volta riconducibili al modulo e ai suoi sottomultipli, ricavati dividendo quest'ultimo in 10 parti [fig. 130]; inoltre si riscontra la sostanziale convergenza con le dimensioni fornite nel trattato di Amico:

- a. l'altezza del primo ordine è pari a 4 moduli e 8 parti; a tale quota si imposta il sovrassesto degli archi della crociera, che raggiunge la quota di 6 moduli e 2 parti; il secondo ordine della navata è alto un modulo;
- b. alla quota di 4 moduli e 8 parti si impostano gli archi della crociera, che raggiungono la quota massima di 8 moduli, ancora una volta rispecchiando quanto indicato da Amico;
- c. la navata centrale raggiunge la quota di 8 parti, misura doppia dell'ampiezza e conforme alle dimensioni fornite da Amico;
- d. gli archi minori si impostano alla quota di 2 moduli e 8 parti e raggiungono la quota massima di 3 moduli e 8 parti;
- e. il tamburo si imposta alla quota di 8 moduli e 6 parti (misurato dalla cornice interna) e ha uno sviluppo verticale di 3 moduli e 2 parti;
- f. la calotta è alta 2 moduli e 4 parti e su di essa si colloca la lanterna, della medesima altezza;

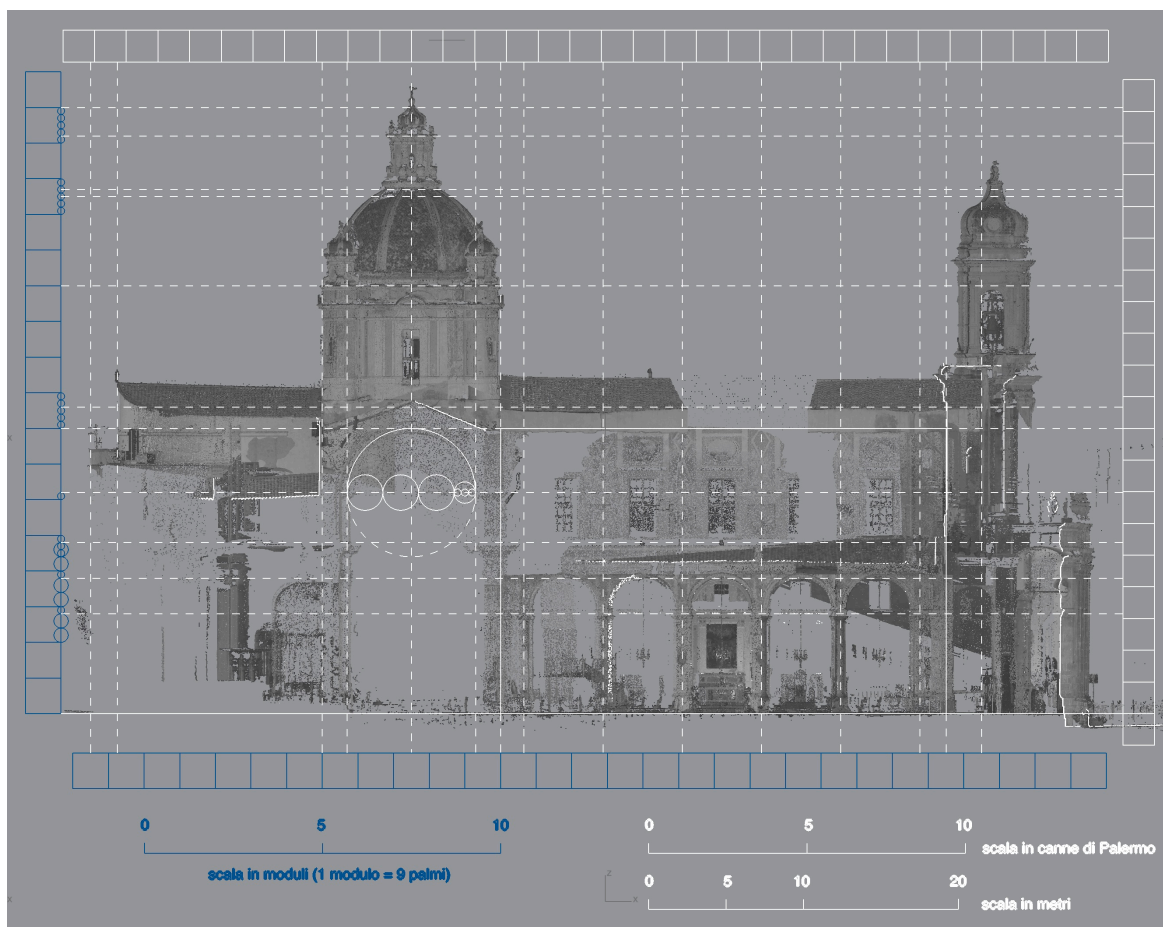


Figura 130; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, sezione longitudinale della nuvola e sovrapposizione dello schema proporzionale rintracciato.

Sono state infine ricercate le matrici geometriche e proporzionali della cupola, per appurare l'effettiva rispondenza allo schema geometrico definito dal progetto di Bonaventura Certo; lo zoccolo sul quale si imposta il tamburo ha una pianta quadrilatera irregolare, che altera anche l'impianto della cupola, costringendo ad adattamenti di entità rilevante; i lati dell'ottagono, pur mantenendo ampiezze di poco differenti, non preservano le condizioni di parallelismo tra lati opposti, determinando variazioni considerevoli in termini di simmetria e modularità tra i lati. La ricerca delle matrici geometriche ha quindi previsto due distinti ambiti d'intervento: in primo luogo ha contribuito a individuare l'ipotetica configurazione di progetto della cupola, al netto delle difformità costruttive; in secondo luogo è servita a valutare la distanza tra il progetto e l'effettiva realizzazione dell'opera, anche in relazione alle esigenze delle indagini strutturali.

La configurazione ideale della cupola [fig. 131] è stata ricostruita seguendo la simmetria dei due assi principali, caratteristica riscontrabile in tutte le altre cupole esaminate; come nel caso di Licata, l'ottagono di base è stato costruito attraverso la rotazione di due quadrati, metodo che avrebbe favorito l'adattamento alle contingenze di cantiere rispetto alla più macchinosa costruzione a partire dal lato noto; i lati così ottenuti hanno dimensioni prossime ai 2 moduli. Il profilo interno del tamburo descrive una circonferenza di diametro pari a 4 moduli, il cui centro è collocato all'intersezione delle diagonali del quadrato; lo spessore murario minimo, definito dalla differenza tra l'apotema dell'ottagono⁴⁶⁶ e il raggio della circonferenza interna, è pari a 5 parti di modulo; lo spessore massimo, determinato come la differenza tra il raggio della circonferenza circoscritta al poligono e il raggio della circonferenza del tamburo, è pari a 7 parti di modulo.

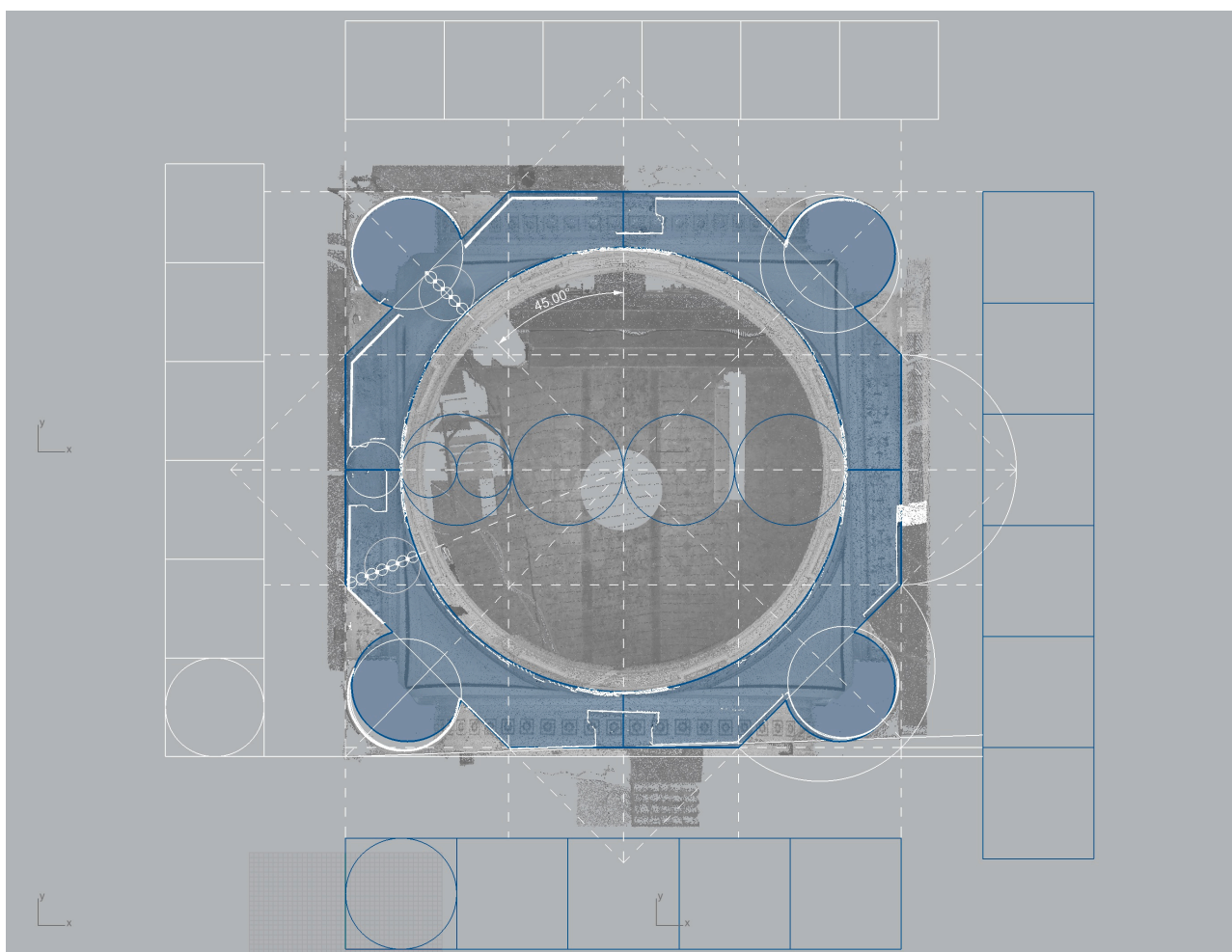


Figura 131; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, sezione orizzontale del tamburo e ipotesi ricostruttiva del progetto di Amico. La sovrapposizione con la nuvola di punti pone in evidenza la distanza tra progetto e opera reale.

L'ispessimento delle sezioni è ottenuto avanzando le pareti laterali del tamburo sino al limite del quadrilatero della crociera, sfruttando quindi tutto lo spazio disponibile sullo zoccolo di base.

Un criterio altrettanto raffinato, ma senz'altro più prudente della soluzione di Licata, è adottato per il posizionamento dei torrini, che hanno diametro pari a un modulo; ancora una volta i torrini sono tangenti ai lati del quadrilatero di rotazione; tuttavia, la scelta di aumentare le sezioni murarie del tamburo⁴⁶⁷ obbliga a rinunciare alla terza condizione di tangenza; la parte visibile dei torrini mantiene quindi le medesime proporzioni impiegate a Licata, anche se il sistema strutturale viene parzialmente modificato.

Dal confronto tra l'ipotesi ricostruttiva e la nuvola di punti è stato possibile valutare la distanza tra progetto e opera costruita; è utile evidenziare che l'assenza di simmetria rilevata nel tamburo produce scarti significativi tra le diagonali della crociera, misurate dal centro della composizione sino all'estremità dei torrini⁴⁶⁸; la deformazione del quadrato di base, inoltre, genera differenze di dimensioni anche nei lati dell'ottagono.

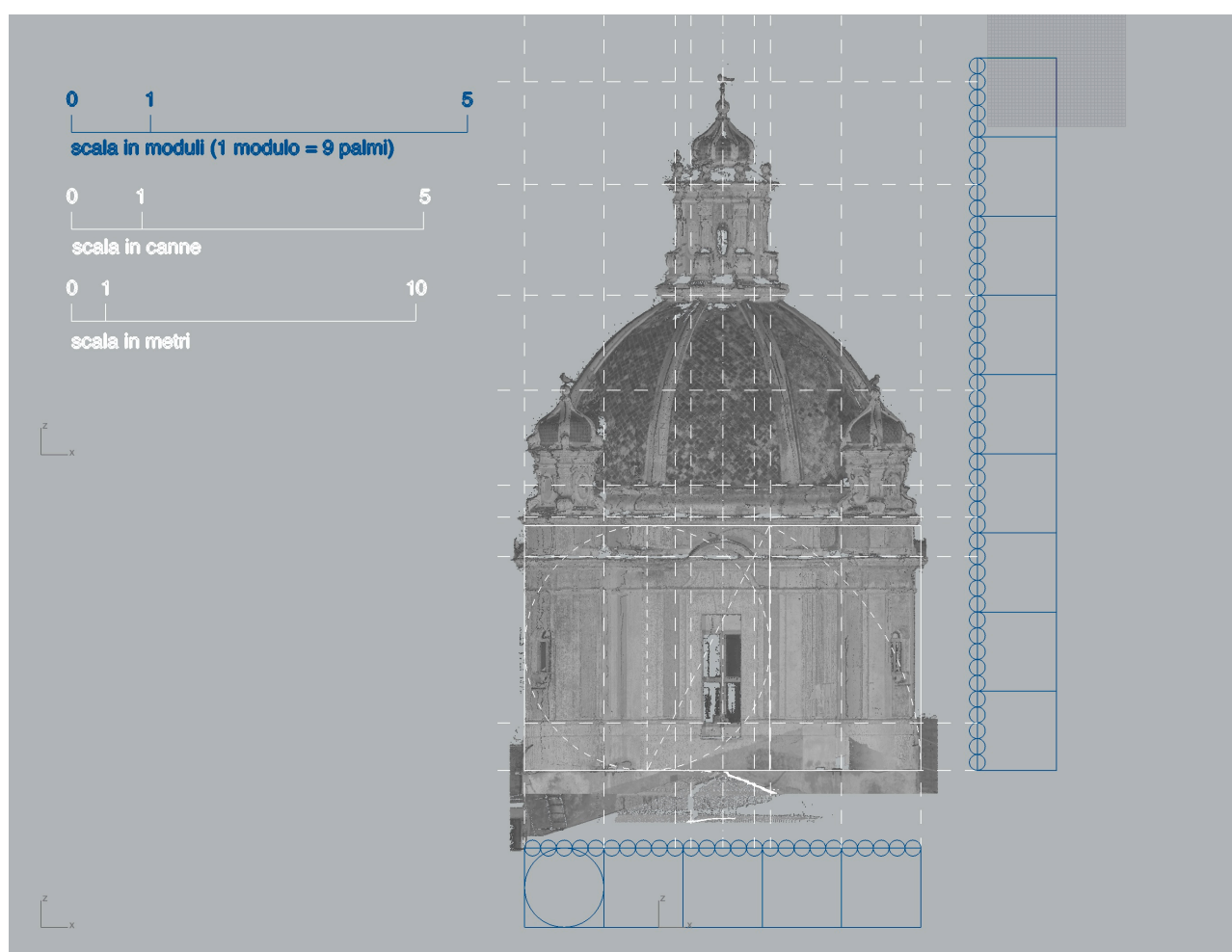


Figura 132; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, dimensionamento dell'alzato del tamburo.

L'altezza del tamburo è determinata costruendo la porzione aurea a partire dal lato di base [fig. 132]; si ottiene una dimensione pari a circa 3 moduli e 2 parti, al netto accettabili tolleranze; su di esso si imposta un anello in pietra di altezza 4 parti, che cinge la calotta all'imposta per bilanciare le spinte orizzontali trasmesse lungo i meridiani; i coronamenti dei torrini, alti 1 modulo e 6 parti risultano isolati dalla calotta, assumendo una connotazione esclusivamente estetica. La calotta, che all'esterno si imposta alla quota di 3 moduli e 6 parti dal piano inferiore del tamburo, raggiunge altezza pari a 2 moduli e 4 parti. Si noti che le dimensioni fornite nel trattato per il dimensionamento delle cupole⁴⁶⁹ variano lievemente da quanto

riscontrato a Trapani; a titolo esemplificativo, la misura del tamburo riportata nella tavola quarta (lettere FF) è pari a 3 moduli e 4 parti, mentre alla voce successiva è riportata l'altezza della 'Volta' della cupola (lettere FG), pari a 2 moduli e 5 parti; in questo modo, il limite tra tamburo e cupola ricadrebbe su un piano orizzontale posto a mezza altezza dell'anello modanato che cinge la calotta, negando qualsiasi rapporto con la configurazione formale della cupola; si è cercato di chiarire quale logica potesse regolare tale scelta compositiva, se si sia trattato di una semplice riduzione di altezza del tamburo o piuttosto di un espediente che celasse una particolare esigenza costruttiva; per tale ragione sono stati rintracciati gli archi di circonferenza che descrivono il profilo a sesto acuto della calotta [fig. 133]; dalla sezione della nuvola è evidente che il profilo acuto della calotta venga tracciato con il metodo del terzo punto e che i centri ricadano su un asse orizzontale posto alla quota di 3 moduli e 4 parti dall'imposta del tamburo; è evidente che Amico abbia applicato le già citate regole di dimensionamento nel progetto strutturale della cupola, servendosi di un espediente costruttivo (l'anello in pietra) per ancorare la calotta al tamburo e prevenire le lesioni sulla calotta; tale espediente, noto come cerchiatura, è uno dei principali metodi di contenimento applicati nel caso di fessurazioni lungo i meridiani delle cupole.

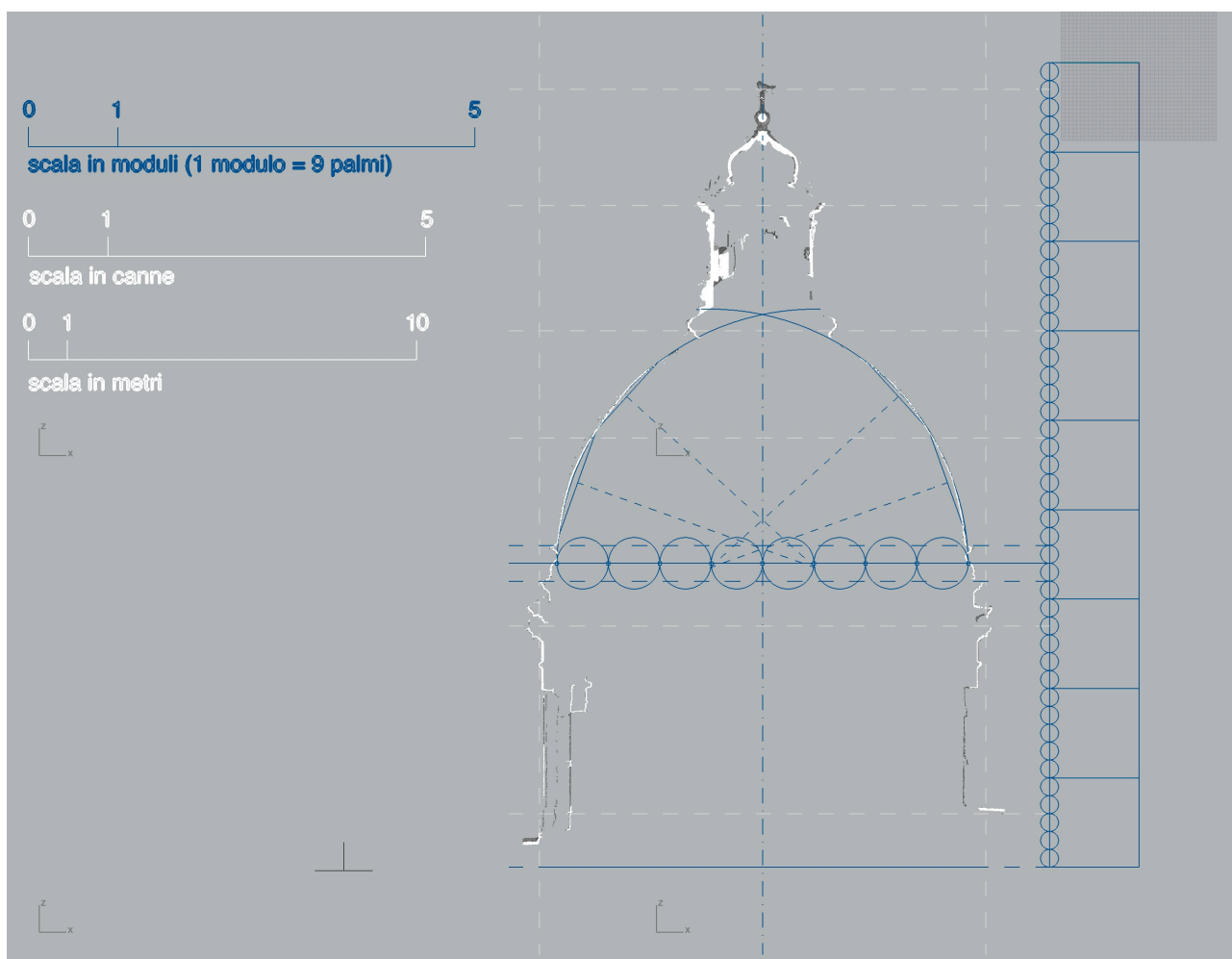


Figura 133; Trapani, cattedrale di San Lorenzo, sezione del tamburo e ricostruzione del piano d'imposta reale della calotta.

5.6 Sintesi e interpretazione dei dati geometrici

L'indagine geometrica condotta sulle cinque cupole ha restituito un sistema complesso di schemi e matrici proporzionali che ha inequivocabilmente guidato le fasi progettuali e costruttive; attraverso l'interpretazione dei dati geometrici si proverà a ricostruire una parte di quell'ipotetico filo d'Arianna, forse assottigliato e sdrucito dal tempo, che lega tali manufatti e che è frutto di esperienze maturate nei secoli.

È ormai chiaro che l'emergenza abbia guidato le scelte operate a Zamora e che pertanto il manufatto sia concepito con criteri apparentemente distinti dalle cupole coeve; esiti formali più ricercati hanno poi guidato il progetto di Salamanca, ispirato al modello di Zamora e ben presto divenuto modello per le successive realizzazioni castigliane. Per le cupole siciliane non è stato possibile valutare i debiti con il modello palermitano a causa dell'assenza di un'adeguata documentazione; piuttosto le matrici proporzionali rintracciate in tali fabbriche hanno permesso di validare l'ipotesi ricostruttiva del Gesù di Palermo. Confrontando gli esiti dell'indagine si evidenziano gli scarti tra le proporzioni adottate per il dimensionamento delle masse murarie; le tabelle di seguito riportate propongono il confronto tra i moduli impiegati per il dimensionamento e una sintesi dei rapporti proporzionali rintracciati, rielaborata in chiave strutturale.

Tabella 3; confronto tra i moduli impiegati per il dimensionamento delle fabbriche.

	<i>pie castillano</i>	<i>canna di Girgenti</i>	<i>canna di Palermo</i>	<i>modulo di 9 palmi (canna di Palermo)</i>
<i>equivalente in centimetri</i>	27,86	206,502	204,614	230,191

Tabella 4: sintesi dei rapporti proporzionali individuati (sole masse murarie)³⁹⁹.

	D	d	S	s	sm	s/d	S/d	S/D	sm/d
Zamora (pies)	42	30	5	1,5	3,25	1/20	1/6	~1/8~	~1/10~
Salamanca (pies)	41	32	5,25	1,25	3,125	1/20	~1/6~	1/8	~1/10~
Toro (pies)	37	31	5	3	4	~1/10~	~1/6~	~1/7<x<1/8~	<1/8
Licata (canna di Girgenti)	4 e 4/10	4	4/10	2/10	3/10	1/20	1/10	1/11	~1/14,5~
Trapani (modulo 9 palmi)	5	4	7/10	5/10	6/10	1/8	~1/6~	~1/7~	~1/6,6~

³⁹⁹ Legenda delle voci in tabella 4: D = diametro esterno del tamburo; d = diametro interno del tamburo; S = spessore murario massimo; s = spessore murario minimo; sm = spessore murario medio.

Tabella 5: rapporto tra le luci delle cupole e le dimensioni del sistema murario composto da tamburo e torrini.

	luce della cupola	diametro dei torrini	spessore della massa muraria complessiva	diametro torrini/luce	spessore masse murarie/luce
Zamora (pies)	30	10	10	1/3	1/3
Salamanc a (pies)	32	9	10,25	1/3,5	1/3
Toro (pies)	31	7,5-8	10,3	~1/4~	1/3
Licata (canna di Girgenti)	4	1	1	1/4	1/4
Trapani (modulo 9 palmi)	4	1	12/10	1/4	1/3,3

I dati sopra riportati pongono in evidenza il ricorrere di rapporti analoghi fra spessori murari e ampiezza delle luci coperte; il rapporto tra l'ampiezza del contrafforte, misurata lungo la diagonale della crociera, e il diametro del tamburo si attesta su valori compresi tra 1/3 e 1/4, con una particolare ricorrenza del primo. Da tali analisi appare evidente che un criterio di proporzionamento per le cupole esistesse già dai tempi più antichi e che sia stato tramandato attraverso i secoli sino ad andare perduto con l'avvento del calcolo matematico per il dimensionamento delle fabbriche.

5.7 Disegni e fotografie d'epoca per lo studio di architetture perdute: la cupola del Gesù

Fino ad alcuni decenni fa, la cupola del Gesù sembrava avvolta in un mistero a tratti insolubile, dovuto prevalentemente alla poche e frammentarie notizie storiche e all'assenza di disegni che ne potessero documentare la configurazione; solo da alcuni anni, pazienti indagini hanno fatto luce, attraverso l'esame delle fonti archivistiche, sull'intrigata e complessa vicenda costruttiva.

Una ricostruzione congetturale dell'originaria configurazione della cupola non è stata finora tentata, probabilmente per l'assenza di un'esaustiva catalogazione delle fonti iconografiche riguardanti la fabbrica e, non meno rilevante, per la difficoltà di distinguere, anche attraverso il rilievo, le parti originarie della fabbrica dalle parti di recente costruzione. Eppure, se si osserva che la distruzione della cupola è avvenuta poco più di settant'anni fa, è a dir poco desolante constatare che la memoria di tale imponente manufatto sia andata perduta con il suo crollo.

A dire il vero, alcuni anni prima dei bombardamenti, le soprintendenze dei capoluoghi siciliani stavano già attuando una politica di tutela⁴⁷⁰ mirata a preservare i principali beni artistici e monumentali dell'isola, trasferendo in luoghi sicuri i primi e costruendo paratie e protezioni effimere per i secondi; è evidente che si trattava di espedienti poco efficaci. A tali misure si sarebbero dovute affiancare esaustive campagne fotografiche, nell'intento di documentare i manufatti nella loro configurazione precedente i bombardamenti; così scriveva l'allora ministro Bottai nell'ottobre del 1939:

Fra le misure da adottare per la difesa dei monumenti dai danni della guerra ritengo opportuno includere il completamento della documentazione fotografica dei monumenti presso gli archivi fotografici di ogni soprintendenza. Se è doveroso, infatti, prendere ogni possibile misura per evitare e attenuare i danni di guerra ai monumenti è altrettanto doveroso raccogliere tutti i dati che eventualmente potessero occorrere per il restauro dei monumenti colpiti o mutilati. Che se poi il monumento fosse interamente distrutto la fotografia, che perpetuasse il ricordo di tutti i particolari del monumento scomparso, acquisterebbe un valore incalcolabile.⁴⁷¹

Tra il 1940 e il '42 veniva così predisposta una vasta campagna di rilievo che avrebbe dovuto interessare tutta l'isola, seguita dalla redazione di appositi inventari di tale documentazione. Purtroppo tali misure rimasero prevalentemente nelle intenzioni, visto l'ingente costo delle operazioni e il sostanziale scompiglio in cui versavano gli uffici di soprintendenza.

Dal 7 gennaio 1943 e per poco più di sette mesi, la città di Palermo perdeva buona parte del suo patrimonio architettonico a causa dei bombardamenti; il 9 maggio 1943, la cupola del Gesù veniva distrutta e in poco più di dieci anni dalla fine della guerra veniva ricostruita una nuova cupola in cemento armato su progetto di Francesco Valenti⁴⁷². Con tale intervento, la memoria storica della cupola del Gesù, di certo radicata nell'immaginario collettivo della città fino al giorno del crollo, veniva definitivamente distrutta.

L'indagine negli archivi della Soprintendenza di Palermo è stata indirizzata al reperimento di inedite tracce di quella documentazione richiesta dal governo alle soprintendenze dell'isola. La ricerca nell'archivio disegni ha condotto a rintracciare tre carpette contenenti elaborati grafici della fabbrica gesuitica; le carpette sono attualmente catalogate⁴⁷³ alla voce *Mon38* (monumento 38), *cassetto A6*, *carpette 38.1, 38.2, 38.3*. Sebbene buona parte di tale documentazione sia già stata pubblicata, se ne descriverà brevemente il contenuto, aggiornandolo al recente riordino.

La carpetta 38.1 contiene diciannove tavole nelle quali sono riportati i disegni a china della nuova cupola. La carpetta 38.2 contiene ventisei tavole, in gran parte copie eliografiche di disegni contenuti nella carpetta 38.1. La carpetta 38.3 contiene cinquantanove tavole in cui sono impaginati disegni risalenti agli anni '63-'64, elaborati da studenti della Facoltà di Architettura di Palermo.

Dall'indagine avviata nel Gabinetto Fotografico di Soprintendenza emerge che l'intera collezione fotografica sul monumento, disponibile anche in digitale grazie alla scansione di alcuni microfilm custoditi nel Fondo Valenti della Biblioteca Comunale di Palermo⁴⁷⁴, è già stata pubblicata in numerosi scritti; si segnala inoltre l'assenza di alcune fotografie precedentemente inventariate. Gran parte della collezione riguarda lo stato della fabbrica dopo il '43, durante il processo di ricostruzione; solo due immagini⁴⁷⁵, raffigurano l'esterno della fabbrica prima del crollo: la prima è una foto della facciata del Gesù che raffigura di scorcio anche la cupola [fig. 134]. La seconda è un'immagine che raffigura la sola cupola del Gesù dal lato di una delle due navate laterali [fig. 135].



Figure 134-135; Palermo, chiesa del Gesù nella Casa Professa, facciata e cupola.

Da una ricerca presso l'archivio dei gesuiti di Casa Professa, sono stati individuati due album di antiche cartoline [fig. 136] che riportano su frontespizio il titolo "Chiesa del Gesù (Casa Professa) Palermo" e il numero della raccolta (Album I, Album II); i due album, stampati dallo Stabilimento Arti Grafiche "Cesare Pezzini & C.", non riportano la data di produzione, ma documentano certamente lo stato dei luoghi prima della guerra.

All'interno del primo album sono presenti dodici cartoline; la prima è immagine della facciata della chiesa con l'antica cupola, che è visibile solo parzialmente; le rimanenti undici riguardano gli interni della chiesa e della sagrestia. Le dodici cartoline del secondo album documentano esclusivamente gli interni della chiesa, la copertura della navata centrale, l'altare maggiore e numerose altre opere d'arte.

Tale raccolta d'immagini costituisce una straordinaria documentazione della fabbrica prima del crollo attraverso cui formulare un'ipotesi ricostruttiva della cupola del Gesù, basata su procedure di restituzione prospettica.

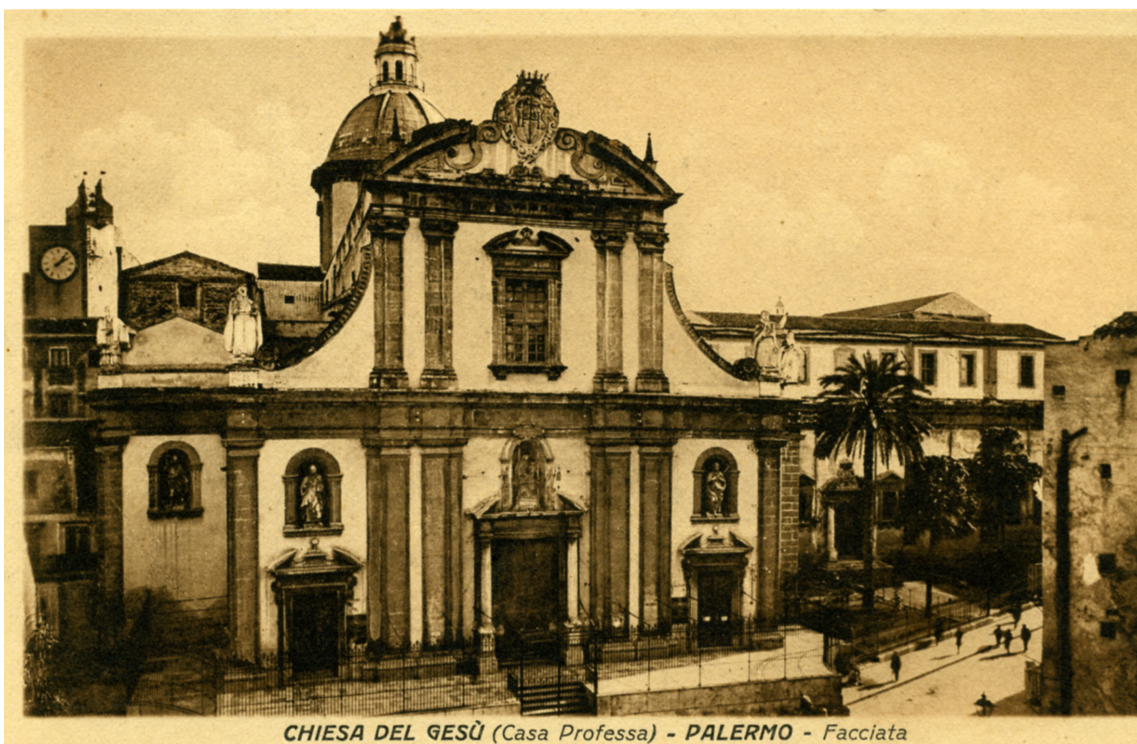


Figura 136; Palermo, chiesa del Gesù nella Casa Professa, tre delle cartoline facenti parte dell'album.

5.8 Il caso della cupola del Gesù: un'ipotesi ricostruttiva

La restituzione prospettica costituisce uno dei metodi per l'interpretazione di manufatti oggi scomparsi ma documentati da immagini fotografiche. Come è noto un'immagine fotografica è sempre una proiezione prospettica, nella quale il centro di proiezione corrisponde al punto nodale dell'obiettivo e il quadro alla pellicola fotografica o al sensore digitale.

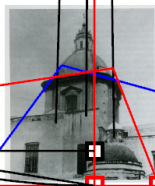
Il primo passo per procedere alla restituzione prospettica di una fotografia è quello di determinare la posizione del centro di proiezione rispetto al quadro; tale posizione, com'è noto, è definita dall'immagine del Punto principale (punto di intersezione con il quadro della retta proiettante ad esso ortogonale) e dalla Distanza principale, ossia della distanza tra il centro di proiezione e il quadro. Per poter procedere poi alla restituzione occorre individuare il piano al quale gli enti geometrici appartengono e determinarne l'intersezione con il quadro (retta traccia). Altro elemento di base per la restituzione prospettica è la determinazione dell'angolo diedro formato dal quadro e dal piano orizzontale; è noto che le proiezioni di rette verticali appaiono concorrere verso un punto proprio quando quest'angolo non è retto.

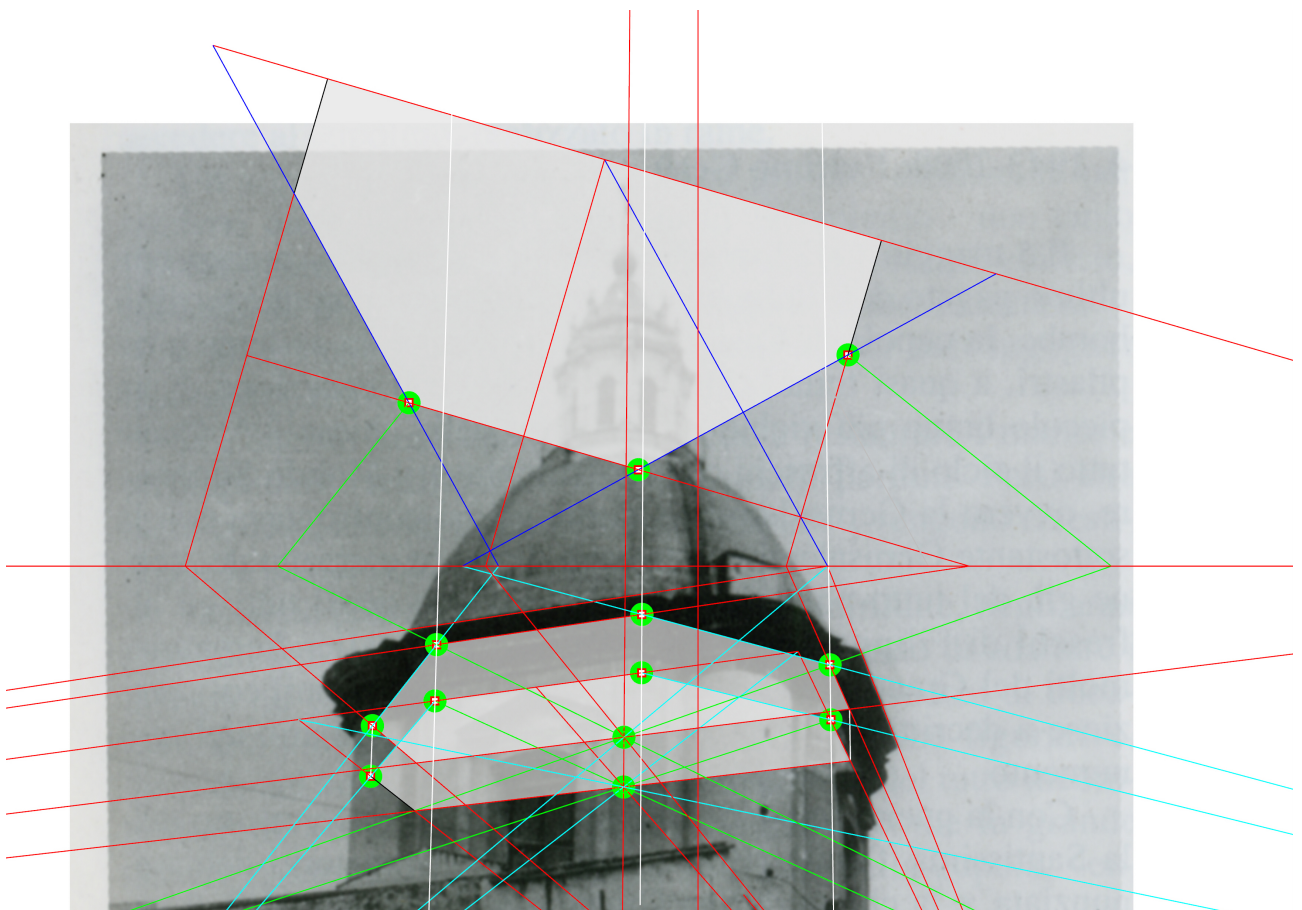
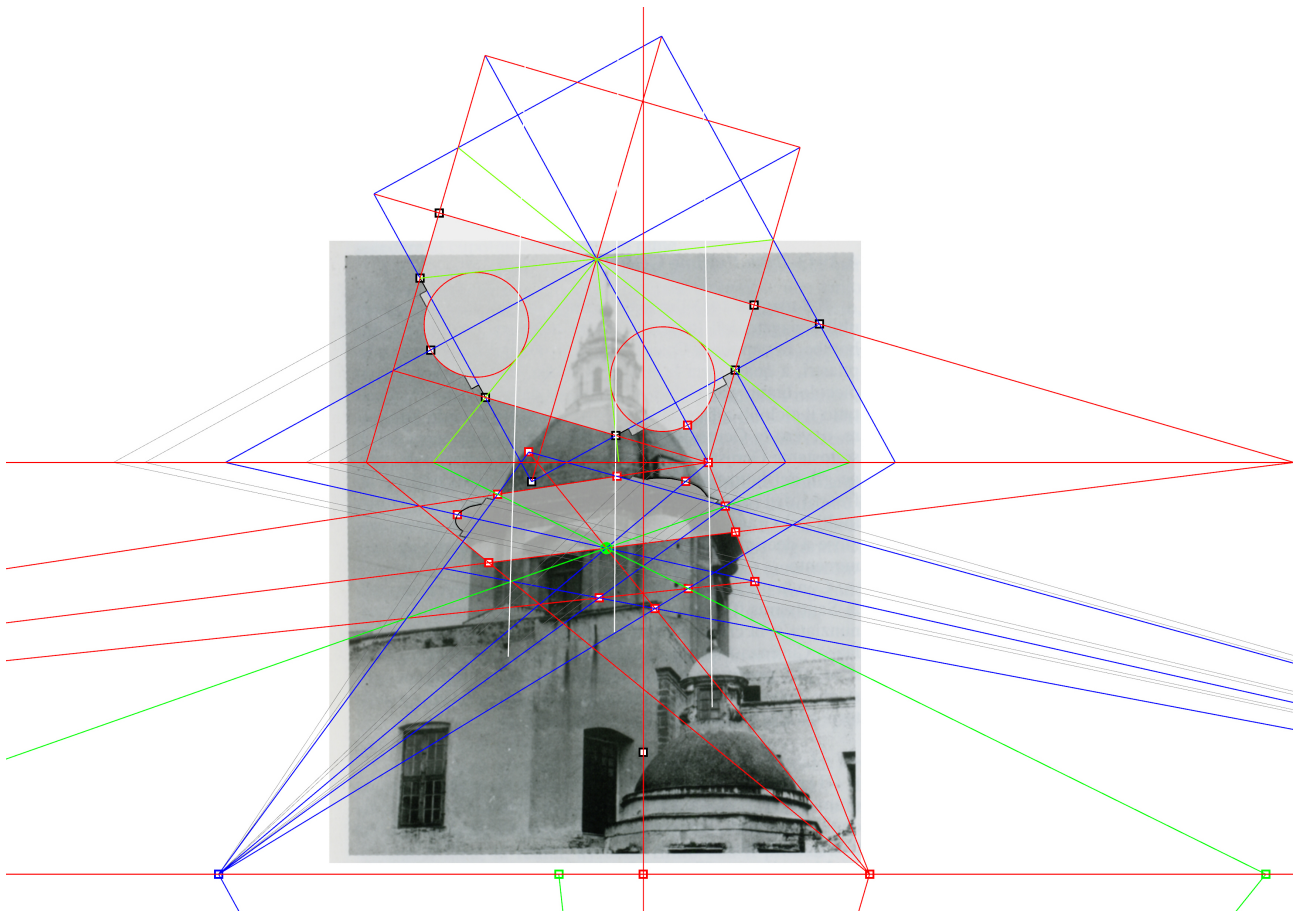
Nelle immagini fotografiche il punto principale corrisponde al centro del fotogramma; pertanto, se si disponesse dell'immagine originale, basterebbe tracciare le diagonali del rettangolo di bordo per determinare il Punto Principale della prospettiva. Nel caso in esame la fotografia della cupola del Gesù a Palermo è stata digitalizzata da testi nei quali è stata pubblicata; si può dunque presumere che l'immagine sia stata ruotata e/o ritagliata e che il punto principale non corrisponda al centro del fotogramma.

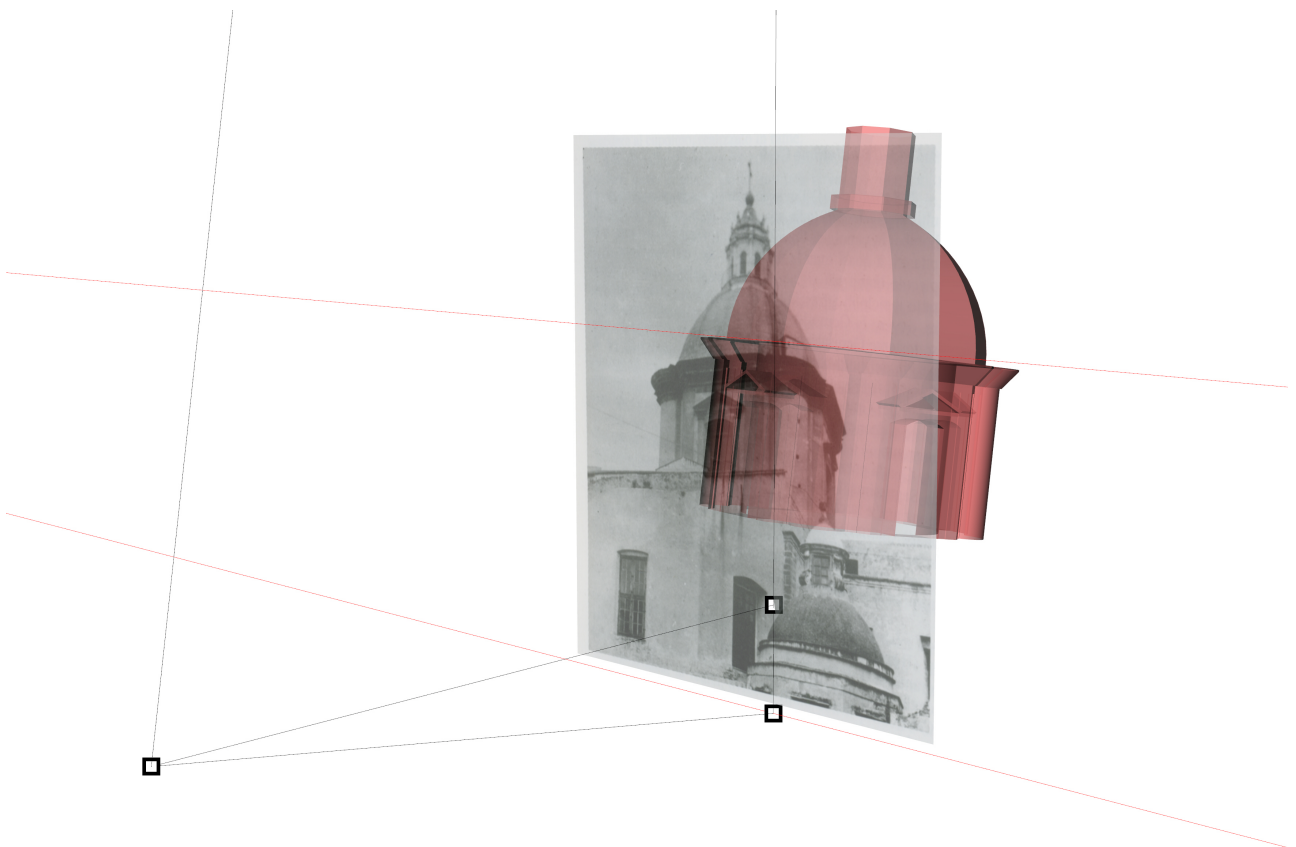
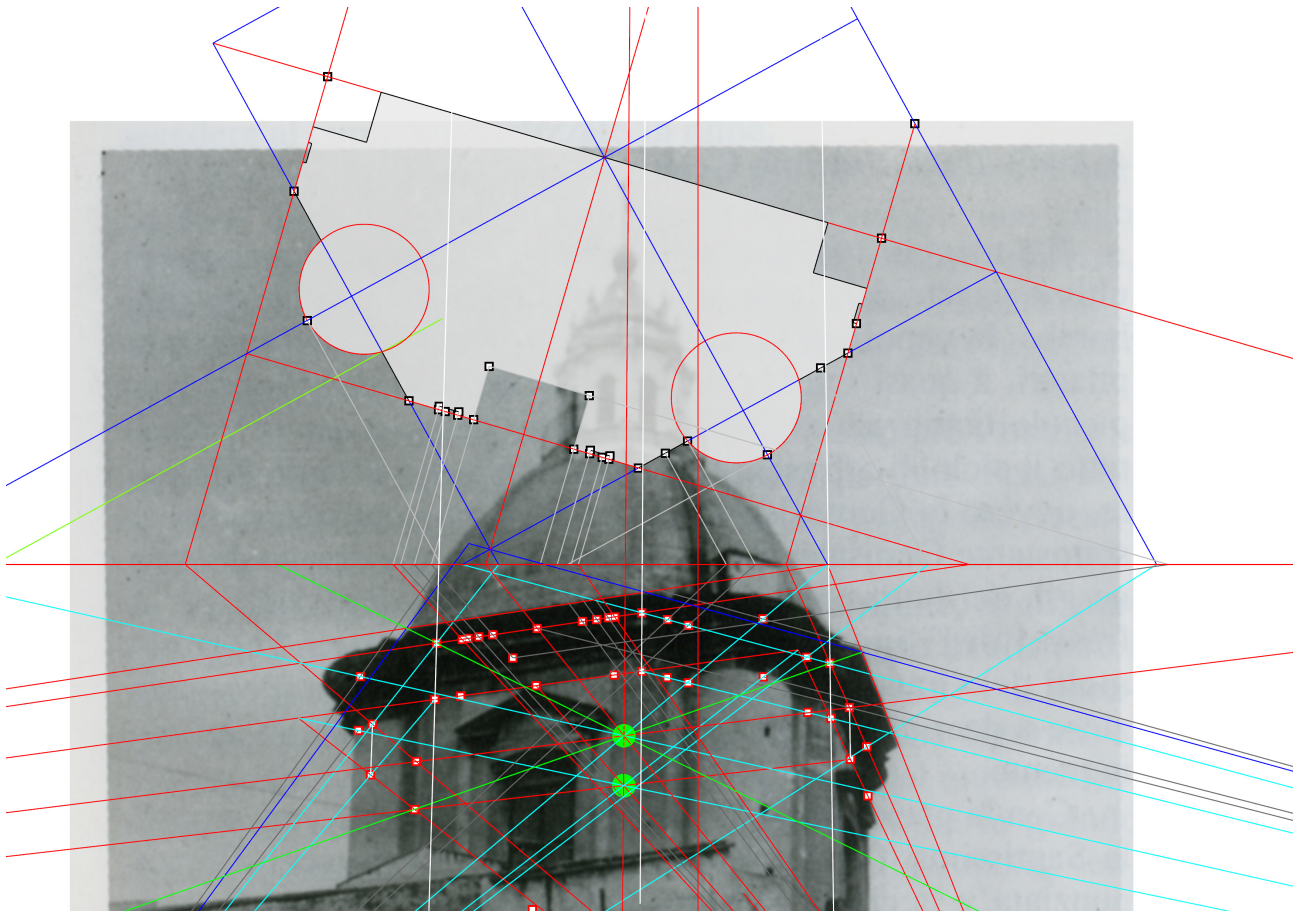
Per la determinazione della Linea d'Orizzonte (luogo geometrico dei punti di fuga di tutte le rette orizzontali) sono stati ricavati i punti di fuga di due direzioni di rette orizzontali ortogonali tra loro; a tale scopo sono state individuati sull'immagine fotografica gli spigoli che al meglio individuassero tali direzioni; tracciate le rette corrispondenti, i punti di fuga sono stati determinati sui loro prolungamenti. La linea d'Orizzonte è stata determinata come congiungente tra i due punti di fuga. L'intero schema grafico (immagine fotografica e linee ridisegnate) è stato ruotato in modo da far assumere alla Linea d'Orizzonte una direzione orizzontale. Ulteriori punti di fuga di rette, che presumibilmente formano con le prime angoli di 45° , sono stati ricavati estendendo le rette disegnate sull'immagine fotografica fino alla Linea d'Orizzonte.

La posizione del centro di proiezione è stata ricavata eseguendo preliminarmente il suo ribaltamento sul quadro, secondo il piano proiettante orizzontale. La determinazione della posizione di tale punto richiede la conoscenza dei punti di fuga di due coppie di rette perpendicolari tra loro, ovvero dei punti di fuga di coppie di rette di cui sia noto l'angolo di incidenza. Nel caso in esame, si è ipotizzato che la pianta della cornice e del tamburo abbiano forma ottagonale, ottenuta come intersezione di due identici quadrati ruotati di 45° . Applicando le relazioni tra angoli al centro e angoli alla circonferenza, sono state disegnate due circonferenze, aventi come diametri i segmenti della L.O. delimitati rispettivamente dai punti di fuga della prima e della seconda coppia di rette ortogonali, corrispondenti rispettivamente alle facce principali del tamburo e della cornice, e alle facce poste a 45° . L'intersezione delle due semicirconferenze dà la posizione del ribaltamento sul quadro del centro di proiezione (Fig. 137). La retta che congiunge il punto di fuga ribaltato con uno dei punti di fuga determina la direzione che assumeranno nella restituzione tutte le rette che verso quel punto di fuga convergono. Conducendo per il punto di vista ribaltato una retta ortogonale alla L.O. si determina la retta di fuga del piano sezione retta del diedro formato dal quadro e dai piani orizzontali. All'intersezione tra questa retta e la L.O. si trova il punto di fuga delle rette di massima pendenza dei piani orizzontali; su questa stessa retta, per le note proprietà dei piani sezione retta del diedro (che non è utile richiamare in questa sede), si troverà il punto di fuga delle rette verticali, ossia delle rette perpendicolari ai piani orizzontali. Sono state pertanto disegnate sull'immagine fotografica alcune rette corrispondenti agli spigoli verticali del tamburo, ed è stata verificata la loro convergenza su un punto della retta di fuga dei piani sezione retta. Tracciando la semicirconferenza avente come diametro la distanza tra il punto di fuga delle rette verticali e il punto di fuga delle rette di massima pendenza, e un arco di circonferenza avente centro nel punto di fuga delle rette di massima pendenza e raggio pari alla distanza tra quest'ultimo e il ribaltamento del

Terminato il processo di restituzione di sezioni orizzontali del manufatto con il ridisegno della pianta del lanternino e della fascia di raccordo tra questo e la cupola, si è proceduto a costruire un modello tridimensionale semplificato della cupola a torrini della Chiesa del Gesù. Al fine di verificare la correttezza della restituzione prospettica, si è proceduto a collocare il modello nella sua corretta posizione con riferimento al quadro (l'immagine fotografica) e al punto di vista (Fig. 142). L'immagine renderizzata, estratta assumendo come centro di proiezione il punto di vista determinato con il processo di restituzione, conferma la buona corrispondenza tra immagine fotografica e proiezione prospettica del modello, e con essa l'attendibilità della procedura seguita (Fig. 143).









capitolo 6 _ I modelli digitali delle cupole su torrini: applicazioni e verifiche strutturali

6.1 Interoperabilità dei modelli digitali: recenti sviluppi e questioni aperte⁴⁰⁰

Come è noto, la rappresentazione non è mai un processo oggettivo, bensì assume una dimensione orientata poiché opera una discretizzazione del *continuum* spaziale congruente a una determinata finalità; i modelli digitali (così come qualsiasi altro prodotto informatico) possiedono una specifica valenza, ossia quella di favorire una dimensione collaborativa tra studiosi di diversi ambiti, ponendo agli esperti della rappresentazione una sfida tuttora insoluta: l'interoperabilità tra i modelli.

Uno tra i più autorevoli studiosi del settore ha dato dell'interoperabilità la seguente definizione:

Interoperability is the ability to exchange data between applications, which smoothes workflows and sometimes facilitates their automation⁴⁷⁶.

Su tale fronte, esiti avanzati sono stati conseguiti nel progetto di nuove costruzioni: grazie allo sviluppo di strumenti che favoriscono una progettazione su più livelli⁴⁷⁷ e grazie anche alla progressiva uniformazione dei processi costruttivi, è possibile oggi condividere le informazioni fra operatori specializzati in diversi settori (strutture, impianti etc.) e aggiornare in tempo reale le modifiche introdotte anche in corso d'opera.

Di recente è stato avviato un ambizioso progetto internazionale denominato Open BIM⁴⁷⁸, frutto della collaborazione tra alcune società di sviluppo *software*, che mira a creare una rete di programmi i cui output siano collegabili tra loro al fine di favorire lo scambio dei modelli nelle piattaforme. Nonostante tale iniziativa, la soluzione del problema del libero scambio dei modelli è ancora lontana da una definizione compiuta; le cause sono da ricercare prevalentemente nelle politiche commerciali delle *software house*, che, più che sviluppare la capacità di comunicazione tra software concorrenti, producono plug-in e applicativi-satellite per i propri software, in modo da offrire soluzioni integrate ma non aperte.

Negli ultimi anni, parte delle energie dei ricercatori afferenti alle discipline della rappresentazione è confluita in ricerche sul tema dell'interoperabilità; a una prima fase di sperimentazione con i più comuni protocolli di scambio (dwg, dxf, IGES, STEP)⁴⁷⁹ è seguita una seconda fase orientata verso l'uso di software BIM. Se nel primo caso le problematiche sono relative prevalentemente alla conversione dei dati, che produce perdita di informazioni e alterazione delle geometrie, nel secondo, le principali difficoltà risiedono nella limitata dotazione di strumenti per la modellazione NURBS e nella sostanziale inadeguatezza alla rappresentazione di superfici complesse, presenti in modo caratterizzante nell'ambito dei beni culturali. Sebbene da alcuni anni esistano protocolli⁴⁸⁰ in grado di garantire lo scambio tra modelli parametrici senza la perdita di informazioni, va osservato che una piena interoperabilità (possibilità di editare il modello anche software diversi da quello con cui è stato generato) è garantita solo per modelli nei quali siano presenti elementi creati secondo specifiche codifiche.

Nell'ambito della documentazione dei beni culturali, che a differenza del settore produttivo è connotato da innumerevoli variabili (stato di conservazione, storia, aspetti formali dei manufatti) e da una limitata standardizzazione dei processi, la questione dell'interoperabilità è pressoché a uno stato embrionale. Solo negli ultimi anni, numerosi sono stati i tentativi di ottenere modelli interoperabili dai dati di un rilievo.

⁴⁰⁰ Questa parte della ricerca non sarebbe stata possibile senza il determinante contributo dei docenti e degli studiosi di strutture afferenti al Dipartimento DICAM dell'Università degli Studi di Palermo. Desidero in particolare ringraziare il professore Salvatore Benfratello per aver suggerito l'utilizzo di modelli 3D per l'indagine strutturale e aver contribuito alla definizione dei livelli di discretizzazione necessari per l'indagine. Un ringraziamento va inoltre alla professoressa Lidia La Mendola, che ha generosamente contribuito alla parte conclusiva dell'indagine, relativa alle prove di carico condotte sui modelli. Le prove sono state eseguite sui modelli prodotti nel corso di questo studio dalla dottoressa ing. Alessia Monaco, cui va la mia più profonda gratitudine.

Alcuni studi hanno raggiunto esiti paragonabili utilizzando procedure e approcci metodologici distinti; a titolo esemplificativo è utile citare le ricerche di Simone Garagnani⁴⁸¹ e del *team* di ricerca del Politecnico di Milano⁴⁸² sulla modellazione BIM. A queste esperienze si aggiungono i tentativi di introdurre il BIM anche in ambiente NURBS grazie a plug-in dedicati.

Le ricerche di Garagnani riguardano lo sviluppo di un *plug-in* per la piattaforma Autodesk Revit, denominato *Green Spider*⁴⁸³, che consente l'importazione di un numero limitato di punti⁴⁸⁴ acquisiti da una scansione laser e il loro impiego come punti di controllo per le curve *freeform* nella modalità di “modellazione masse” [fig. 144]; questa procedura offre il significativo vantaggio di produrre oggetti BEM complessi, che possono essere archiviati come elementi delle librerie del software; tali modelli, ottenuti da curve interpolate ai punti della nuvola, riproducono in modo relativamente fedele le superfici rilevate, ma per contro richiedono un processo di produzione oneroso.

Il restauro della Basilica di Collemaggio presso L'Aquila, condotto da studiosi del Politecnico di Milano, ha costituito l'occasione per una ricerca multidisciplinare complessa, che partendo dal rilievo è approdata all'analisi strutturale della fabbrica e al conseguente progetto di consolidamento. Il tentativo di superare il problema dell'interoperabilità è stato condotto attraverso la costruzione di un modello NURBS da cui sono state estratte le curve che ne costituiscono il profilo [fig. 145]; in seguito è stata eseguita l'importazione di tali curve in ambiente BIM e la successiva generazione di oggetti parametrici nativi⁴⁸⁵.

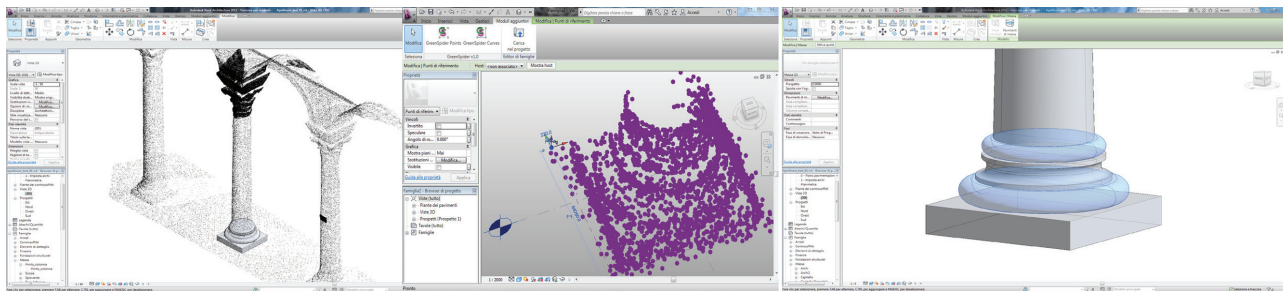


Figura 144 (in alto); processo di modellazione di una colonna con Green Spider (GARAGNANI).

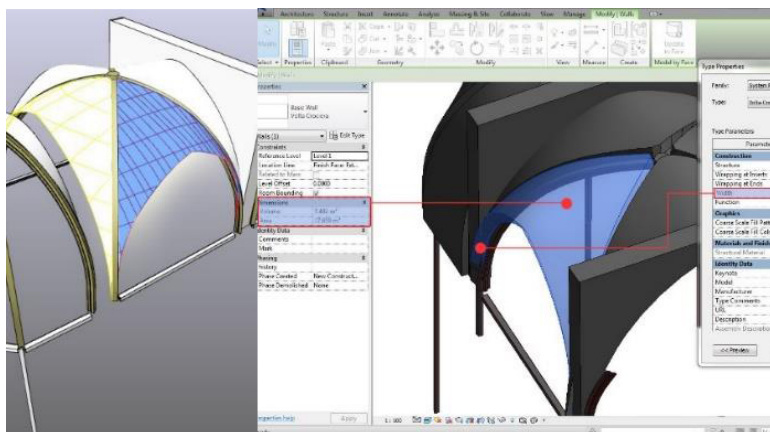


Figura 145 (a sinistra), esiti delle procedure di modellazione sperimentate dal team del Politecnico di Milano (Oreni et al., 2014)

Stando ai limiti di tali procedure e alla sostanziale inadeguatezza di un protocollo che garantisca l'interoperabilità dei modelli, ci si è chiesti quale sia lo scopo di un dettagliato rilievo dell'esistente e di una discretizzazione eseguita su più livelli semantici, se gli esiti di tali dispendiosi processi sono tuttora destinati alla sola estrazione degli elaborati grafici tradizionali. Nell'ambito della conservazione, inoltre, accade spesso che alla fase di documentazione seguano una fase diagnostica di matrice strutturale e interventi di consolidamento statico e adeguamento antisismico. Anche in questo caso, l'assenza di procedure codificate conduce gli operatori a produrre nuovi modelli. Più che sui protocolli di scambio⁴⁸⁶, i limiti specifici di questo settore risiedono nel grado di complessità del modello sul quale condurre le indagini e sul grado di semplificazione richiesto per il calcolo; a titolo esemplificativo si noti che la modellazione di strutture intelaiate avviene generalmente per mezzo di elementi monodimensionali (*beam*) che vengono combinati tra loro per prefigurare la configurazione tridimensionale della sola struttura di un edificio; a questi vengono

associati la sezione e il materiale di cui sono costituiti; nel caso delle murature, la discretizzazione conduce a usare elementi piani (*shell*) e solo di rado elementi solidi (*brick*) [fig. 146].

Una parte di questa ricerca è stata dedicata a verificare, allo stato attuale dello sviluppo informatico, se esista una procedura capace di garantire l'interoperabilità dei modelli NURBS con software BIM e con software per l'indagine strutturale, valutando quali siano i livelli di semplificazione geometrica necessari. Per il primo caso (da NURBS a BIM) è stato impiegato il plug-in VisualArq⁴⁸⁷ per Rhinoceros, già citato nella prima parte di questo studio; per il secondo caso (da NURBS ad analisi strutturale FEM) sono stati prodotti due modelli NURBS solidi delle cupole di Zamora e di Trapani, aventi gradi di complessità distinti. Per quest'ultimo interrogativo sono stati raggiunti esiti che saranno discussi nei paragrafi successivi, mentre i test condotti con VisualArq hanno evidenziato la presenza di limiti imposti dall'architettura di tali software, che non consentono ancora la piena interoperabilità.

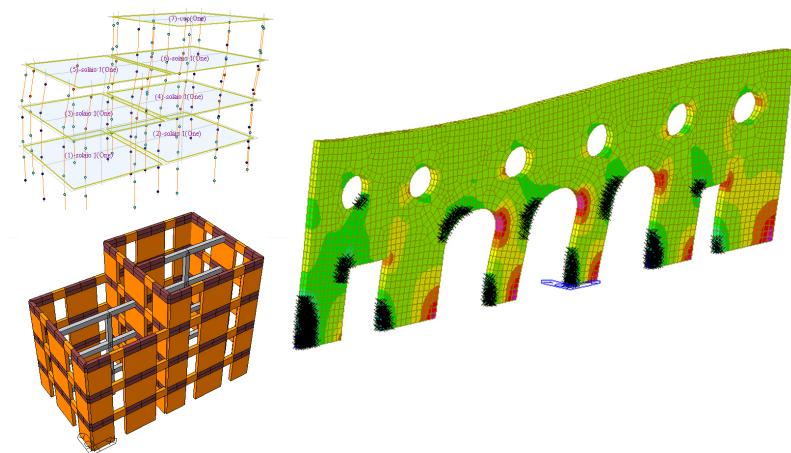


Figura 146; modelli per l'analisi strutturale generati per mezzi di elementi beam, shell e brick (Midas, TUZZA 2010)

Il plug-in permette la generazione di elementi BEM in ambiente CAD attraverso tre ordini di comandi, che definiscono tre gradi distinti di complessità geometrica [fig. 147]: i controlli più semplici riguardano la generazione di oggetti parametrici standard, concepiti secondo la logica BEM tradizionale e pertanto riconoscibili come elementi nativi dagli altri software BIM (famiglia “muro”, “scala”, “solaio” etc.); una seconda categoria di comandi consente la creazione di elementi di tipo “muro” attraverso operazioni booleane o estrusione di profili *freeform*; una terza categoria consente infine di associare i solidi NURBS creati con gli strumenti di Rhinoceros a una specifica famiglia parametrica (*tag*).

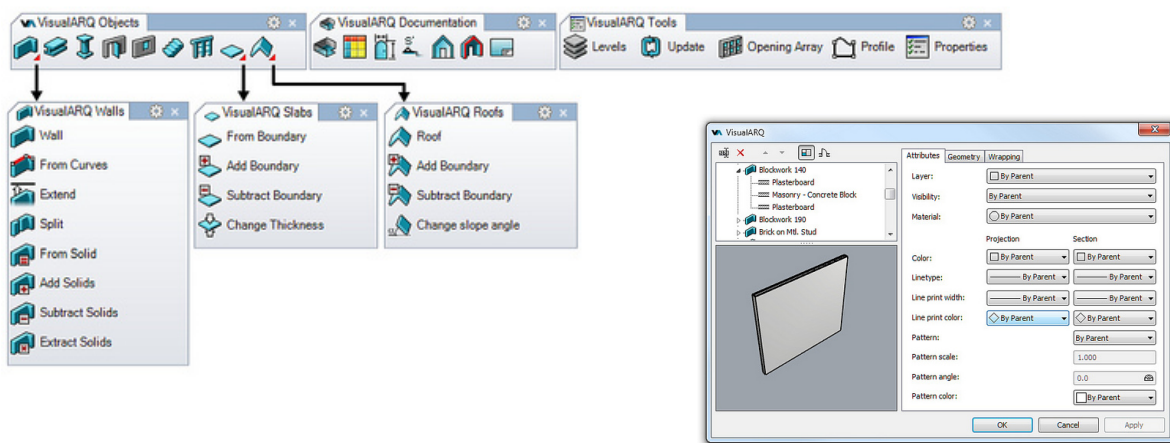


Figura 147; Panoramica dei comandi e interfaccia di creazione elementi BEM del plug-in VisualArq per Rhinoceros;

I test condotti con oggetti della prima categoria (importati su Autodesk Revit con protocollo IFC) hanno dato esito positivo. Si è proceduto quindi alla costruzione di elementi “muro” per addizione di solidi complessi al muro generico di VisualArq; anche in questo caso l’importazione su Revit è avvenuta con successo; tuttavia il software, pur riconoscendo la famiglia di appartenenza del solido non ne gestisce i parametri intrinseci (spessori, tipologia costruttiva, materiali). Altri tentativi sono stati condotti attraverso la sottrazione booleana di solidi NURBS da elementi di VisualArq, la generazione di elementi da curve di bordo, o ancora l’associazione di *tag* parametrici a solidi generici [fig. 148]; in tutti i casi è stato possibile attribuire parametricamente spessori murari e layer materici direttamente dall’interfaccia di VisualArq e si è potuta constatare la sostanziale coerenza tra i solidi “muro” e gli altri elementi BEM di VisualArq (apertura automatica del vano finestra, auto aggiornamento delle caratteristiche geometriche dell’elemento etc.); nel caso di solidi irregolari rimangono inalterate le caratteristiche parametriche, ma permangono limitazioni nell’associazione tra parametro e geometria corrispondente e conseguentemente nelle possibilità di editare il modello. Analoghe limitazioni sono state riscontrate nello scambio dei modelli con il protocollo IFC.

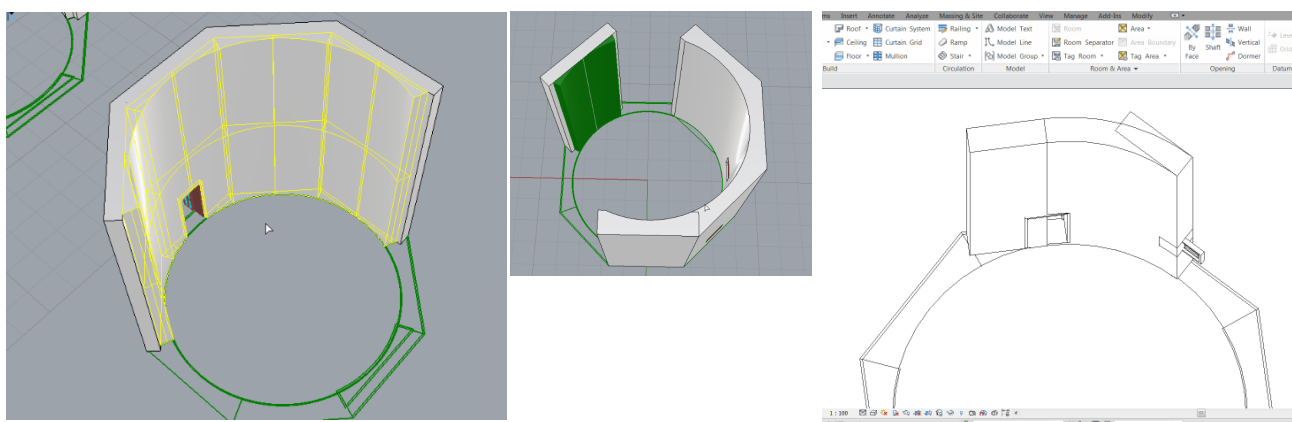


Figura 148; Modelli parametrici creati da solidi NURBS e importati su Autodesk Revit; si noti l’alterazione delle geometrie nel passaggio da un software all’altro.

Si deduce che sotto il profilo dell’interoperabilità, Revit e VisualArq garantiscono una piena compatibilità solo se gli elementi parametrici sono stati creati con strumenti convenzionali; nel caso di solidi complessi si riscontrano due ordini di difficoltà: la prima è legata all’incapacità del software sorgente di aggiornare la configurazione “fisica” di tali elementi in modo coerente con le modifiche attribuite ai parametri⁴⁸⁸; la seconda riguarda la piattaforma di destinazione, che non riconosce pienamente i parametri di elementi non nativi.

Per quanto concerne l’interoperabilità tra modelli NURBS e modelli per l’analisi strutturale FEM, sono stati condotti test su due software: Midas FEA⁴⁸⁹ e Dassault Systèmes Abaqus⁴⁹⁰. Entrambi i software garantiscono la lettura dei più comuni protocolli di scambio e possiedono strumenti per la creazione di mesh solide.

La costruzione dei modelli è stata eseguita fissando preventivamente i criteri di discretizzazione e il loro livello di dettaglio. Il modello della cupola di Trapani è stato discretizzato per mezzo di cinque categorie di elementi solidi, distinti per comportamento statico: pennacchi, tamburo, torrini, calotta e lanterne. In Rhinoceros gli elementi di cui sopra sono stati modellati come polisuperfici chiuse, mantenendo inalterata la complessità geometrica degli elementi e ignorando elementi decorativi secondari [fig. 149]; particolare attenzione è stata dedicata al controllo delle superfici di contatto tra elementi solidi al fine di prevenire possibili compenetrazioni.

La cupola di Zamora è stata discretizzata in un numero maggiore di elementi, in ragione della complessità del manufatto; il tamburo è stato scomposto in quattro elementi costitutivi [fig. 150]:

- a. sostegni polilobati;
- b. muratura di tamponamento;
- c. archi a rincassi;
- d. masse murarie superiori.

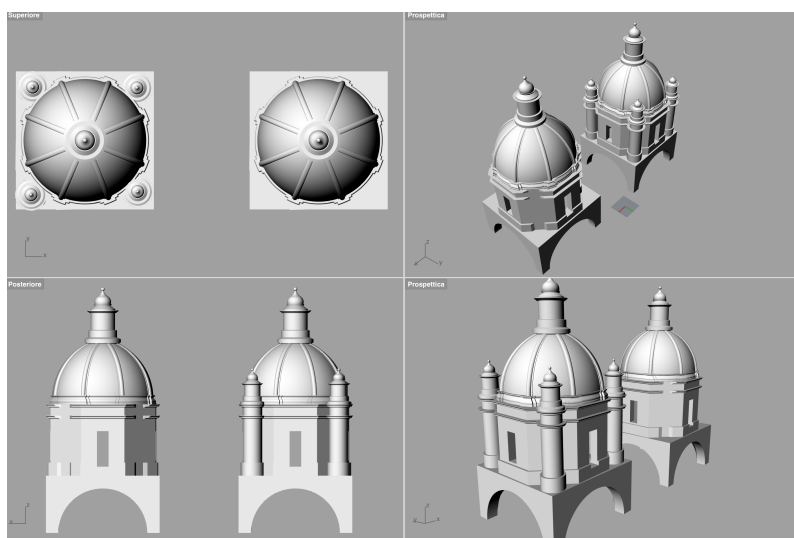


Figura 149; Modelli solidi della cupola di Trapani nelle due configurazioni (con e senza torrini) generati con il software Rhinoceros per superfici chiuse. I modelli sono stati depurati delle complessità geometriche non strettamente necessarie.

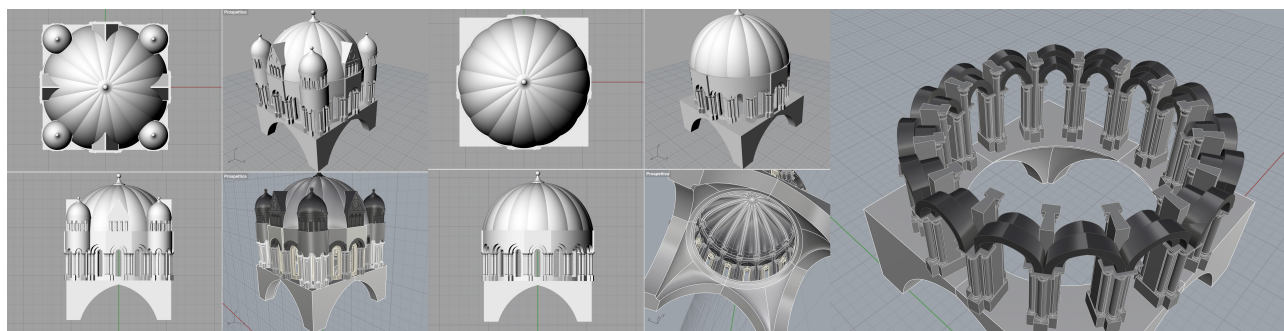


Figura 150; Modelli solidi della cupola di Zamora nelle due configurazioni (con e senza torrini) generati con il software Rhinoceros per superfici chiuse. I modelli mantengono un livello di complessità geometrica elevato al fine di valutare i limiti dei software di calcolo.

Il medesimo criterio ha guidato la costruzione dei torrini; infine le parti strutturali della calotta sono state distinte dal resto della muratura, ipotizzando che quest'ultima non assolva alcuna funzione portante.

Ciascuna categoria di elementi è stata registrata in un file dedicato, nei formati IGES e STEP⁴⁹¹; il formato STEP ha prodotto i migliori risultati in termini di compatibilità e di trasferimento di informazioni.

In entrambi i software di analisi strutturale sono state riscontrate le medesime difficoltà nella lettura di elementi solidi generati in Rhinoceros con l'utilizzo di funzioni avanzate di modellazione (*sweep*, *revolve*). Tali problemi sono stati corretti da Abaqus in modo automatico, mentre in Midas FEA è stato necessario personalizzare i parametri di importazione [fig. 151].

Al termine della procedura di importazione, le parti del modello sono state unite in modo automatico ed è stata quindi eseguita la trasformazione dei modelli analitici in mesh solide costituite da tetraedri. L'ultima fase è stata dedicata alla caratterizzazione materica e strutturale delle parti del modello.

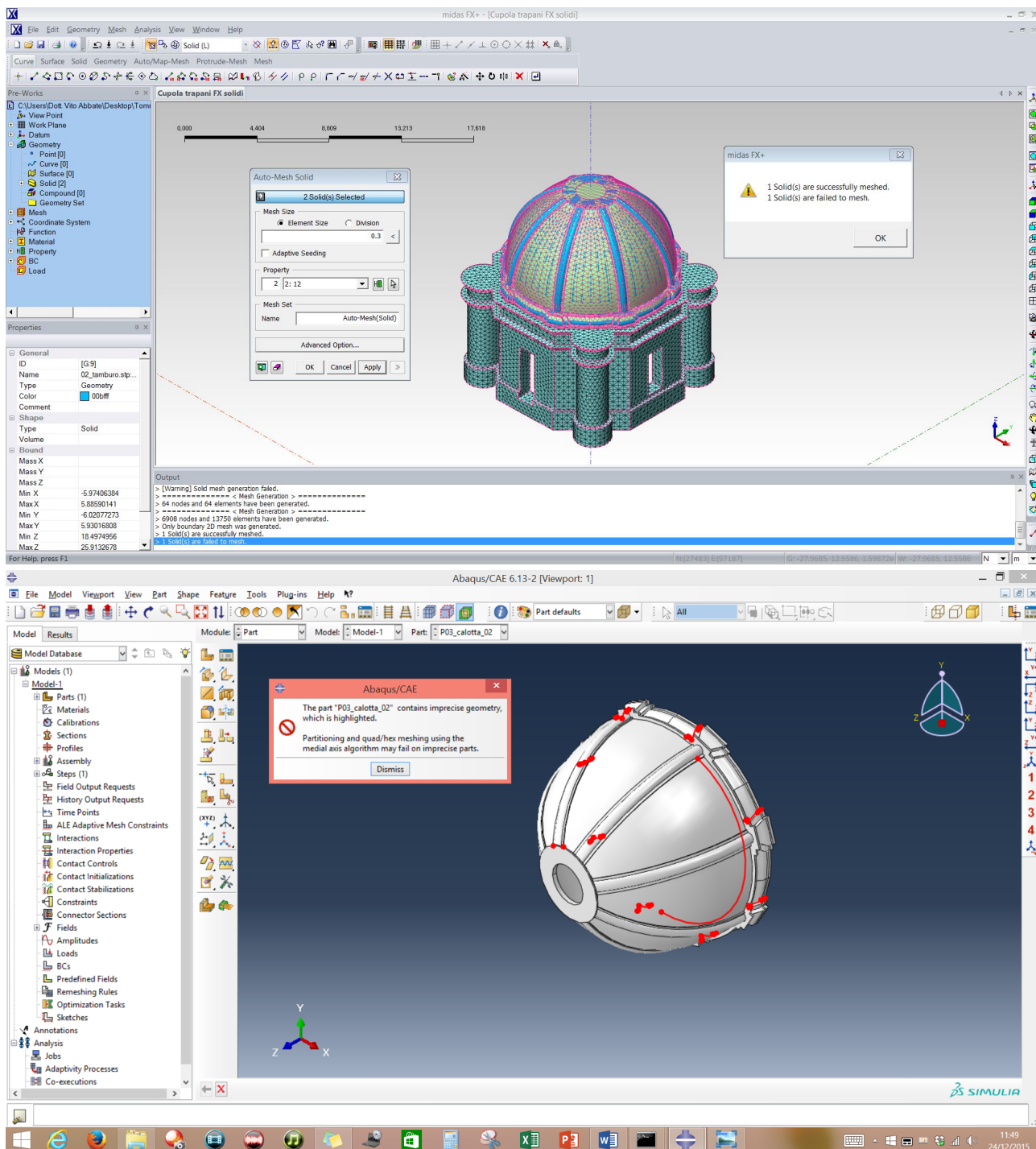


Figura 151; esiti dell'importazione della calotta in Midas FEA e Abaqus.

6.2 Cupole su torrini angolari: un modello efficiente?

Come ampiamente discusso nei capitoli precedenti, l'inserimento dei torrini agli angoli delle cupole è stato eseguito prevalentemente allo scopo di migliorare il comportamento statico delle strutture. L'analisi geometrica della cupola di Zamora ha fatto emergere elementi a favore dell'ipotesi che l'inserimento dei torrini sia avvenuto a seguito del manifestarsi di degradi strutturali; il successo di tale espediente ha determinato la nascita del modello di cupola a torrini; le ragioni statiche che hanno determinato il diffondersi di tale modello vengono esplicitate nella già citata proposta per il consolidamento della cupola di San Pietro in Roma.

A conclusione del lavoro di ricerca è sembrato opportuno eseguire una verifica strutturale in merito al contributo offerto dai torrini all'equilibrio statico delle strutture; tale verifica si propone di dimostrare l'efficacia dei sistemi di conversione dei modelli dai software NURBS a quelli di analisi FEM e ancora di offrire un ulteriore contributo agli studi delle fabbriche evidenziando quale sia l'entità del contributo che i torrini offrono al comportamento strutturale delle fabbriche. Per questo motivo l'analisi strutturale delle due fabbriche è stata eseguita considerando il comportamento statico della cupola con e senza torrini.

Prima di procedere alla descrizione dei risultati ottenuti, è utile chiarire brevemente il sistema di tensioni innescate sulla calotta, facendo riferimento alla teoria delle cupole sottili; nella teoria *membranale*, la cupola è discretizzabile con porzioni di sfera delimitate da due meridiani e due paralleli adiacenti; per effetto dei carichi verticali, su ciascuna superficie elementare si trasmettono sforzi che agiscono lungo i meridiani e lungo i paralleli e che trovano, nell'elemento stesso, il loro equilibrio [fig. 152]. In una cupola di rotazione così definita, due meridiani contigui individuano due unghie, il cui comportamento statico è riconducibile a quello dell'arco; tale discretizzazione era già ampiamente adottata dagli studiosi del Settecento, che riconducevano pertanto il comportamento delle cupole a una più semplice formulazione; due paralleli adiacenti individuano porzioni circolari di sfera, assimilabili ad anelli chiusi. I meridiani trasmettono i carichi della cupola dalla chiave all'imposta, con azioni assiali di compressione, mentre lungo i paralleli si trasmettono azioni tangenziali, meglio note come sforzi cerchianti; sull'anello di chiave, tali sforzi sono anch'essi di compressione e la loro intensità decresce negli anelli inferiori sino ad annullarsi pressappoco in prossimità delle reni (angolo di colatitudine); al di sotto di tale quota gli sforzi cerchianti diventano di trazione e raggiungono la massima intensità sul parallelo d'imposta [fig. 153]. Lo schema appena descritto definisce in modo semplificato ma esaustivo il sistema di forze che si innescano in una cupola ideale; nella realtà costruttiva bisogna tenere conto dell'esigua resistenza a trazione del materiale lapideo, circostanza che tende a produrre fessurazioni per effetto degli inevitabili sforzi di trazione; se l'intensità della trazione supera la resistenza del materiale si verificano lesioni lungo i meridiani della calotta [fig. 154], che possono estendersi in direzione verticale anche sul tamburo.

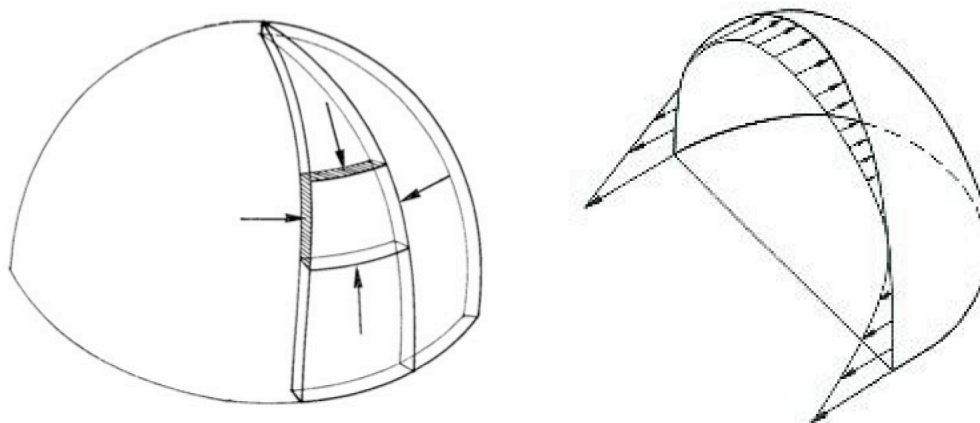


Figura 152; superficie elementare nella teoria membranale; Figura 153; distribuzione degli sforzi cerchianti in una cupola.

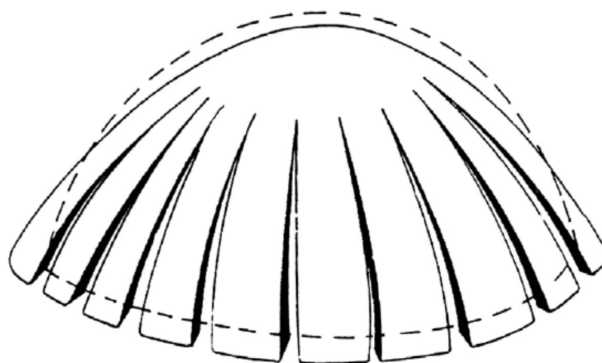


Figura 154; meccanismo di dissesto dovuto a sforzi cerchianti.

Con riferimento alla cupola di Trapani, la configurazione dotata di torrini mostra una riduzione complessiva dell'intensità delle tensioni [Fig. 155] e una più ampia distribuzione delle stesse sui pennacchi. L'analisi riflette inoltre la configurazione asimmetrica della cupola, evidenziando la presenza di un carico eccentrico rispetto all'asse verticale della calotta, dovuto al peso della lanterna; tale eccentricità è evidente dall'esame della deformata, che mostra la tendenza della lanterna a ruotare attorno a una cerniera lineare, posta all'attacco con la cupola; dalla mappatura cromatica delle tensioni si rileva una concentrazione degli sforzi in corrispondenza di tale cerniera.

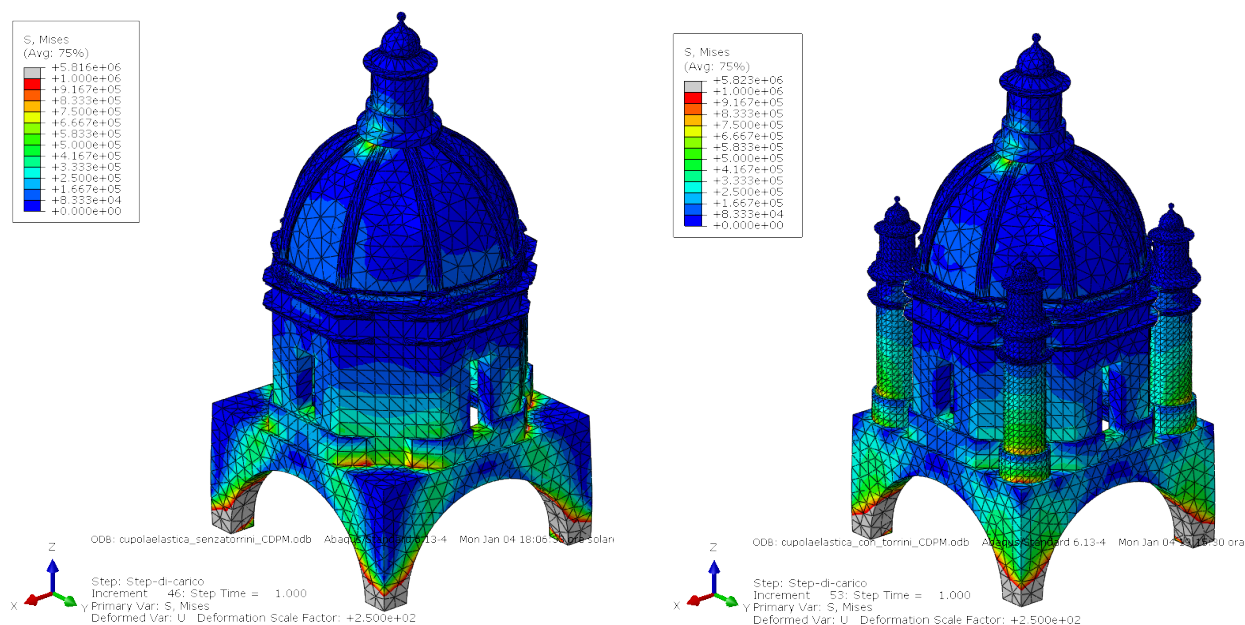


Figura 155 (a) tensioni che interessano il tamburo nelle due configurazioni esaminate

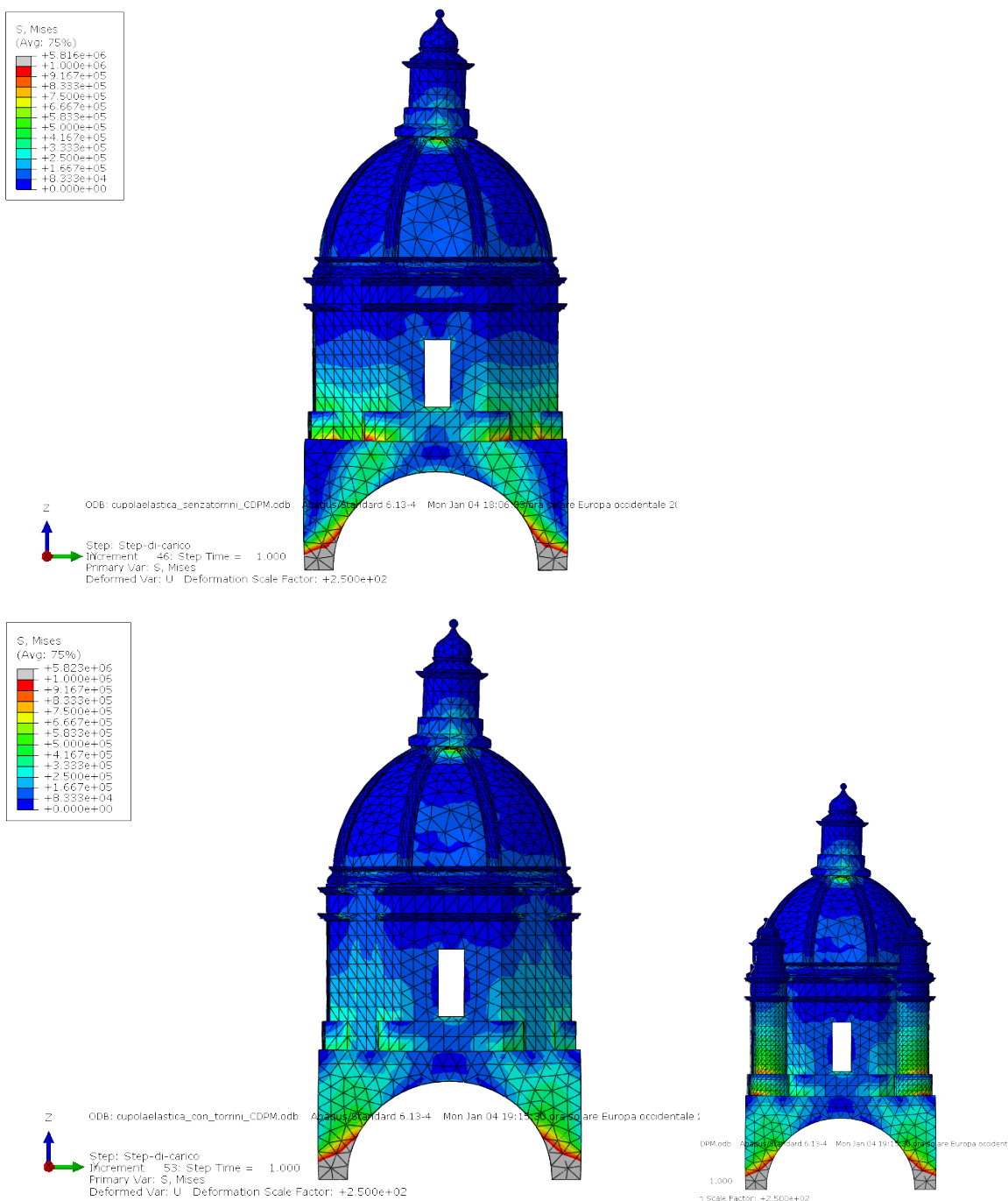


Figura 155 (b) tensioni che interessano il tamburo e la calotta nelle due configurazioni esaminate; dalla seconda configurazione sono stati occultati i torrini per facilitare la percezione del grafico a falsi colori.

L'indagine sulla cupola di Zamora è stata condotta con analoghi presupposti metodologici, utilizzando le medesime caratterizzazioni materiche e condizioni di vincolo; analogamente al caso precedente, gli esiti dell'indagine mostrano la tendenza a tensioni più contenute nel modello provvisto di torrini [fig. 156]. Le immagini a falsi colori mostrano inoltre il rapporto tra le tensioni che agiscono sulla cupola e la tensione limite a trazione del materiale, oltre la quale si innescano fenomeni di lesione; da tali immagini si evidenzia che nella configurazione senza torrini si manifestano sforzi di trazione superiori alla trazione limite di cui è capace il materiale (coefficiente di sicurezza <1); viceversa nella configurazione a torrini, tali valori sono superiori alla tensione limite; quest'ultimo aspetto può avvalorare l'ipotesi che la costruzione dei torrini sia

avvenuta in un momento immediatamente successivo al disarmo delle calotte e che tale espediente abbia effettivamente migliorato il comportamento statico della struttura.

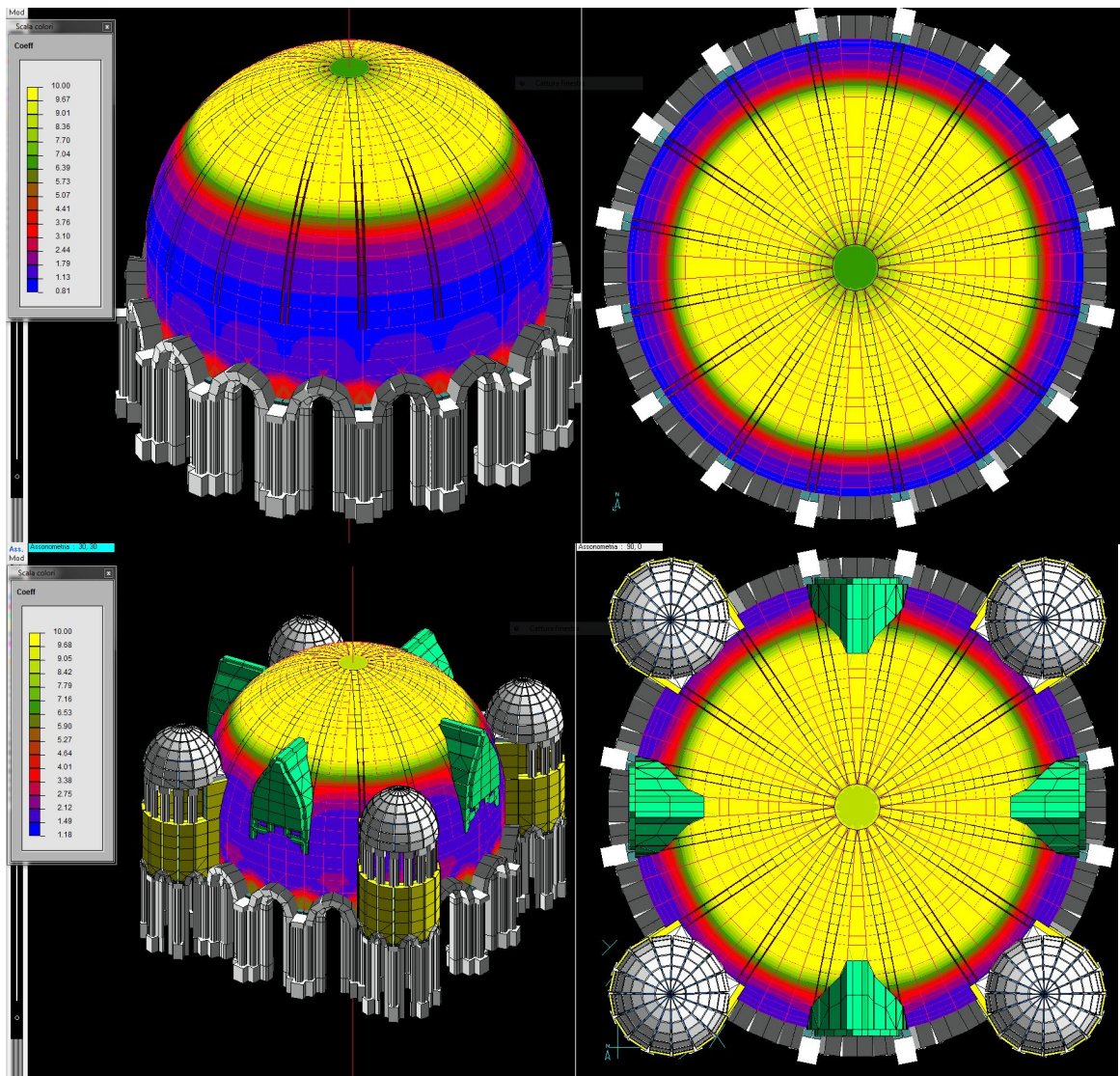


Figura 156; cupola di Zamora, nella configurazione senza torrini il rapporto tra tensione limite del materiale e tensione sviluppata è inferiore a 1; pertanto nelle aree interessate si verificano lesioni.

¹⁴⁹ RIVERA DE LAS HERAS 2001, pp. 28-29.

¹⁵⁰ AVRIAL 1889; GODDARD, KING, 1925; GÓMEZ MORENO 1903 [ed. 1927]; HERSEY, 1937. Secondo la letteratura, il modello trova raffronti linguistici nell'architettura di Poitiers o di Aulnay-de-Saintonge.

¹⁵¹ TORRES BALBÁS 1922, pp. 146-152.

¹⁵² LAMPÉREZ ROMEA 1930, [edizione consultata 1999].

¹⁵³ A spicchio d'arancia.

¹⁵⁴ GÓMEZ MORENO 1905 [ed. 1927], vol. I, p. 103; più recentemente VIÑAYO GONZÁLEZ 1987, pp. 303-406, in dettaglio p. 404.

¹⁵⁵ GÓMEZ MORENO 1905 [ed. 1927], op. cit., pp. 104-105.

¹⁵⁶ D'ARPA 2007, pp. 114-119.

¹⁵⁷ Ciro D'Arpa riferisce l'ipotesi attributiva di Marco Nobile in D'ARPA 2000, p. 50 nota 31; In seguito anche SCHLIMME 2006; NOBILE 2007; D'ARPA 2007, op. cit. Francesco Buonamici è attivo in Sicilia e a Malta tra il 1635 e il 1659. Sull'attività dell'architetto lucchese si veda anche DE LUCCA, THAKE, 1994; THAKE 1995, DE LUCCA 2006; NOBILE 2012, [1].

¹⁵⁸ PIAZZA 2013, p. 130.

¹⁵⁹ D'ARPA 2007, op. cit., p. 118.

¹⁶⁰ NICOTRA 1960, pp. 155 e segg.

¹⁶¹ Manoscritto custodito presso la Biblioteca Apostolica Vaticana (B.A.V.), Cicognara, V, 3849, e trascritto in SCHLIMME 2006, op. cit., pp. 59-61.

¹⁶² Una circolare del 1613 imponeva inoltre che «inviato [...] nella Provincia il disegno approvato, per essere messo in esecuzione, se ne richiedeva una copia da conservare in archivio». In tal modo si assicurava che ai disegni approvati non venissero apportate modifiche. Cfr. BURGIO 2009, p. 25.

¹⁶³ NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 95.

¹⁶⁴ PIRRI 1970.

¹⁶⁵ BOSCARINO 1956, pp. 8-19; RUGGIERI TRICOLI 1993, pp. 295-297.

¹⁶⁶ RUGGIERI TRICOLI 1993, op. cit., pp. 56-57.

¹⁶⁷ NOBILE 2012, [1], op. cit., e in dettaglio nello stesso contributo la *Bibliografia Ragionata* di Maria Rita BURGIO, pp. 105-114.

¹⁶⁸ L'insegnamento delle discipline dell'architettura inizialmente non era previsto dai programmi delle accademie del Collegio Romano. BURGIO 2009, op. cit., p. 28.

¹⁶⁹ NOBILE 2009, op. cit., pp. 15-16.

¹⁷⁰ Documento edito in PIRRI 1955, doc. XXXVI (30.12.1574).

¹⁷¹ L'architetto è coinvolto anche nei cantieri di Palermo (1586) e Trapani (1595).

¹⁷² NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 99.

¹⁷³ NOBILE 2012, [2], p. 21.

¹⁷⁴ Tra i più recenti contributi sul tema si vedano SUTERA 2013; SUTERA 2015.

¹⁷⁵ RUGGIERI 2013.

¹⁷⁶ Quest'ultimo espediente è proposto da Giovanni Biagio Amico per la già citata proposta di consolidamento della cupola di San Pietro a Roma. SCHLIMME 2006, op. cit.; NOBILE 2012, [2], op. cit.

¹⁷⁷ Da alcuni anni è stato avviato uno studio multidisciplinare da docenti dell'Università degli Studi di Palermo (Stefano Piazza, Fabrizio Agnello, Salvatore Benfratello) sulla cupola della chiesa di Sant'Angelo a Licata, finalizzato a un quadro analitico più ampio in corso di elaborazione. Cfr. PIAZZA 2013, op. cit. Altri studi sul tema delle dotazioni antisismiche degli edifici storici sono disponibili in NOBILE 2012 [2], op. cit., NOBILE 2012 [3].

¹⁷⁸ Ossia lo spazio occupato da presbiterio e abside.

¹⁷⁹ RIVERA DE LAS HERAS 2001, op. cit., p. 44 (versione digitale).

¹⁸⁰ Secondo alcuni studi il trasferimento non sarebbe mai avvenuto; cfr. RAMOS DE CASTRO 1977, pp. 99-100; RAMOS DE CASTRO 1982, pp. 24, 115. Sulla questione cronologica cfr. NAVARRO TALEGÓN 1996, pp. 92-93.

¹⁸¹ Traducibile in «chiesa di San Salvatore che fu fondata in Zamora dal patriarca Bernardo, venerabile vescovo di quest'ultima»; *Archivo de la Catedral de Zamora* (A.C.Z.), *Signatura* 1412 8 (C-1) (7), documento trascritto in RAMOS DE CASTRO 1982, op. cit., *Apéndice Documental*, Documento 2.

¹⁸² A.C.Z., *Signatura* 1420 14 (D-4) (24).

¹⁸³ L'ipotesi che la chiesa sia stata fondata dal vescovo Esteban è in RIVERA DE LAS HERAS 2001.

¹⁸⁴ Il riferimento ad *Aldephonsus Imperator Rex VIII* sembrerebbe essere un refuso nella trascrizione dal testo originale, cfr. RIVERA DE LAS HERAS 2001, op. cit., p. 62, nota 9 (versione digitale).

¹⁸⁵ Tale informazione è riportata in RAMOS DE CASTRO 1982, op. cit., p. 23, sulla base di una donazione concessa dal sovrano del Portogallo in cui si fa implicito riferimento al culto di alcuni Santi nella chiesa.

¹⁸⁶ RIVERA DE LAS HERAS 2001, op. cit., p. 45.

¹⁸⁷ RAMOS DE CASTRO 1982, op. cit., p. 195.

¹⁸⁸ Gli scavi sono stati condotti in prossimità dell'attuale sacrestia. Gli esiti di tali indagini sono stati in parte esposti dall'archeologa Hortensia Larrén Izquierdo in un intervento dal titolo *Arqueología de la Catedral de Zamora*, durante il convegno *El Arte Románico en*

Zamora VIII. La Catedral de Zamora: formas, contextos, caminos, Zamora, 9-24 aprile 2013. Atti di prossima pubblicazione.

¹⁸⁹ LAMBERT 1931.

¹⁹⁰ LAMPÉREZ ROMEA 1930, [edizione consultata 1999], op. cit., pp. 376, 522.

¹⁹¹ GÓMEZ MORENO 1905 [ed. 1927], op. cit., pp. 100-101.

¹⁹² *Ivi*, p. 105.

¹⁹³ Restauro eseguito nel 1942 da Luis Menéndez Pidal.

¹⁹⁴ GONZÁLEZ 1943.

¹⁹⁵ Liberata dalla presenza saracena nei primi anni del XII secolo, la città di Salamanca costituiva un'unica diocesi con la vicina sede di Zamora sotto il vescovato di Jerónimo Visque de Périgord. Dal 1120 le due diocesi venivano rese indipendenti e fino all'ultimo quarto del secolo buona parte dei territori sotto la loro influenza veniva assegnata ad altre sedi vescovili.

¹⁹⁶ Il documento, custodito presso l'*Archivo de la Catedral de Salamanca* (A.C.S.) è pubblicato per la prima volta in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, pp. 83-85.

¹⁹⁷ La locuzione *sicut melius potueritis*, lascia intendere che le risorse economiche del popolo non fossero sufficienti a sostenere l'edificazione dell'attuale cattedrale, bensì di una più modesta chiesa dedicata alla Vergine e utile a favorire il primo ripopolamento dell'area; infine, l'uso del termine latino *plantear* confermerebbe che, a quella data, il sito a cui si fa riferimento doveva probabilmente essere libero da altre costruzioni; PORTAL 1992, p. 77.

¹⁹⁸ MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 92-93.

¹⁹⁹ I delicati equilibri costruiti dopo la *Reconquista* avevano condotto alla nomina di tre vescovi distinti per la diocesi di Salamanca; cfr. BERRIOCHOA 1986, pp. 134-135; PORTAL 1992, op. cit., p. 79.

²⁰⁰ A partire da questo momento, il periodo economicamente favorevole che vive la città rende superflue altre donazioni del sovrano.

²⁰¹ BERRIOCHOA 1986, op. cit., pp. 142-146.

²⁰² Il documento, custodito presso l'A.C.S., è edito in VILLAR MACÍAS 1887, p. 232.

²⁰³ BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 147; PORTAL 1992, op. cit., p. 83.

²⁰⁴ PORTAL 1992, op. cit., pp. 87-88.

²⁰⁵ Documento pubblicato in GONZÁLEZ 1943, op. cit., p. 45.

²⁰⁶ GONZÁLEZ 1943, op. cit., pp. 46-47.

²⁰⁷ Documento trascritto per la prima volta in GÓMEZ MORENO MARTÍNEZ 1902; in seguito anche in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 449-454; un'analisi

più recentemente del documento è in RIESCO 1996.

²⁰⁸ CAMÓN AZNAR 1958, pp. 274-280.

²⁰⁹ PRADALIER 1978, pp. 33-34; BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 155; PORTAL 1992, op. cit., p. 87.

²¹⁰ PORTAL 1992, op. cit., pp. 87-88.

²¹¹ BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 199.

²¹² A.C.S., *cajón* 3, *legajo* 2, n. 17 – 2, edito in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 159-160.

²¹³ *Ivi*, pp. 171-172, 200-205.

²¹⁴ BERRIOCHOA 2002;

²¹⁵ Nei documenti dell'A.C.S. sono citati i seguenti maestri: Florín de Pituenga, Casamandro Romano, Alvar García, Petro Petriz, Sancho Pedro e Juan Franco. Rimane tuttavia sconosciuto il ruolo che tali maestri hanno avuto nella fabbrica. Tormo y Monzó individua quattro maestri della cattedrale, cfr. TORMO Y MONZÓ 1930, pp. 40-41; secondo Camón Aznar, i maestri che si succedono e talvolta si sovrappongono nella direzione della fabbrica sono: il maestro delle absidi (1140-1154), il maestro dei pilastri (1155-1160), il maestro che costruisce le volte delle navate laterali (1160-1170), il maestro del chiostro (1162-1178), il maestro delle volte della nave centrale (fino al 1180) e il maestro della Torre del Gallo (1180-1200); cfr. CAMÓN AZNAR 1958, op. cit., pp. 274-280.

²¹⁶ GONZÁLEZ 1943, op. cit.; un disegno dell'autore con l'indicazione dell'area occupata dall'edificio oggetto della compravendita è pubblicato in BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 150.

²¹⁷ A.C.S., *cajón* 16, *legajo* 1, n. 28 – 2; edito in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 148-149. L'individuazione del 1175 come probabile data di avvio lavori nel chiostro è riportata in BERRIOCHOA 1986, op. cit., pp. 156-157.

²¹⁸ A.C.S., *cajón* 20, *legajo* 2, n. 22; *Ivi*, pp. 158-159.

²¹⁹ PORTAL 1992, op. cit., pp. 88-89.

²²⁰ A.C.S., *cajón* 16, *legajo* 1, n. 6; edito in GONZÁLEZ 1944, p. 186.

²²¹ A.C.S., *cajón* 3, *legajo* 1, n. 30; edito in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 199-200.

²²² Il documento è custodito presso l'*Archivo Hispánico Nacional* (A.H.N.), *Clero, Salamanca, Catedral, carpeta* 1880, n. 15, edito in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 212-213; sull'ipotesi di parentela tra i due maestri cfr. GONZÁLEZ 1943, op. cit., p. 50.

²²³ A.C.S., *cajón* 6, *legajo* 3, n. 1; edito in MARTÍN MARTÍN et al., 1977, op. cit., pp. 257-258.

²²⁴ Tagliapietre.

²²⁵ PORTAL 1992, op. cit., p. 90.

²²⁶ BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 163.

²²⁷ *Ivi*, pp. 164-165.

²²⁸ *Ivi*, pp. 167-168.

²²⁹ CAMÓN AZNAR 1958, op. cit., pp. 275-276

²³⁰ BERRIOCHOA 2002, op. cit., pp. 31-32; per una trattazione più dettagliata delle fasi costruttive esposte sinteticamente nel seguito si veda BERRIOCHOA 1986, op. cit., pp. 189-228.

²³¹ Tale copertura, la cui realizzazione è provata dalla presenza di mensole che ne dovevano sostenere il peso, viene realizzata in legno e sostituita solo dopo il completamento del chiostro.

²³² Secondo la letteratura in questa seconda fase intervengono due maestri nella costruzione delle volte del transetto: il primo maestro si occupa delle coperture nelle campate più prossime alla cupola; il secondo realizza la volta nel braccio meridionale.

²³³ Su quattro delle cinque campate della navata centrale si nota una disposizione dei filari delle vele ortogonale ai lati della campata; nella terza crociera, invece, la *plementeria* assume una configurazione a cerchi concentrici; tale tecnica è impiegata anche nelle crociere delle navate laterali e suggerisce pertanto che le opere appartengano a distinte fasi costruttive; Valentín Berriochoa nota inoltre che gli archi acuti delle tre campate occidentali raggiungono una quota più elevata rispetto a quelli più prossimi alle absidi; per tale ragione e per le differenze riscontrabili negli apparati scultorei dei capitelli delle colonne addossate, le crociere delle prime due campate orientali sarebbero state costruite durante la seconda fase dei lavori; le ultime tre crociere e una parte di quelle delle navate laterali durante la terza fase. Cfr. BERRIOCHOA 1986, op. cit., pp. 209-210.

²³⁴ GÓMEZ MORENO 1903 [ed. 1927], op. cit., pp. 100.

²³⁵ CAMÓN AZNAR 1958, op. cit., pp. 274-280.

²³⁶ PRADALIER 1978, op. cit., pp. 192-193; BERRIOCHOA 1986, op. cit., pp. 215-227.

²³⁷ CASASECA CASASECA 2008, p. 16; *Enciclopedia del Románico en Castilla y León*, Fund. Santa Maria La Real. Centro de estudios del románico, 2015, pp. 225-287.

²³⁸ Lo smontaggio della cupola avviene a causa delle sue scarse condizioni di conservazione, sotto la direzione dell'architetto Enrique María Repullés y Vargas; nel 1918 l'architetto intende rimontare la cupola, ma tale operazione non viene eseguita a causa della scarsità dei fondi; il manufatto è stato poi rimontato alcuni anni più tardi (1925-27) sotto la direzione dell'architetto García Guereta.

²³⁹ BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 221.

²⁴⁰ PRADALIER 1978, op. cit., BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 225.

²⁴¹ NAVARRO TALEGÓN 2005, p. 9.

²⁴² QUADRADO, PARCERISA, 1861, pp. 97-103; GÓMEZ MORENO 1905 [ed. 1927], op. cit., pp. 205-2016.

²⁴³ A.C.Z., *Signatura* 1412 8 (C-1) (6).

²⁴⁴ NAVARRO TALEGÓN 2005, op. cit., pp. 20-21.

²⁴⁵ GÓMEZ MORENO 1905 [ed. 1927], op. cit., pp. 206-207.

²⁴⁶ NAVARRO TALEGÓN 2005, op. cit., p. 25.

²⁴⁷ Sulla figura del maestro Giovanni Tristano si veda PIRRI 1955, op. cit.

²⁴⁸ RUGGIERI TRICOLI 2001, p. 47.

²⁴⁹ Disponibile online all'indirizzo riportato in sitografia ref. [7].

²⁵⁰ D'ARPA 2007, op. cit., p. 114; NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 92.

²⁵¹ MACALUSO 1973, n. 5, p. 117.

²⁵² RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 49.

²⁵³ *Monumenta Historica Societatis Iesu* (M.H.S.I.), *Confessiones, Ribad.*, I 78, in PIRRI 1955, op. cit., p. 51, nota 21.

²⁵⁴ L'edificio è orientato con l'asse longitudinale in direzione nord-ovest/sud-est e con abside a sud; il fatto che i lavori siano iniziati dalla parte opposta all'abside, contro ogni prassi costruttiva, potrebbe indicare che le aree a sud fossero ancora occupate. *Archivum Romanum Societatis Iesu* (A.R.S.I.), *Ital.* 124 f. 271, in PIRRI 1955, op. cit., pp. 51-52 e p. 52, nota 22.

²⁵⁵ RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 50.

²⁵⁶ PIRRI 1955, op. cit., p. 52.

²⁵⁷ A.R.S.I., *Ital.* 133 f. 7.

²⁵⁸ D'ARPA 2007, op. cit., p. 114.

²⁵⁹ RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 52.

²⁶⁰ Documento citato in PIRRI 1955, op. cit., p. 53.

²⁶¹ A.R.S.I., *Sic.* 1, f. 34-35, in PIRRI 1955, op. cit., p. 53.

²⁶² RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 57.

²⁶³ *Ivi*, p. 59.

²⁶⁴ *Ibidem*; in nota 345, l'autrice riporta la collocazione del documento in questione: *Archivio di Stato di Palermo* (A.S.Pa.), *Case ex Gesuitiche*, v. H1, f. non numerato, in data 25.02.1598.

²⁶⁵ B.n.F., Hd- 4, n. 118; V.R. 224, disponibile online all'indirizzo riportato in sitografia ref. [8].

²⁶⁶ B.n.F., Hd-4, n. 119; V.R. 225, disponibile online all'indirizzo riportato in sitografia ref. [9].

²⁶⁷ AGUILERA 1740, pp. 244-246.

²⁶⁸ RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., pp. 64.

²⁶⁹ NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 93.

²⁷⁰ RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., pp. 52-53.

²⁷¹ GIANNINO 1956.

²⁷² NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 92; Tommaso Blandino sarebbe morto nel 1629, poco prima dell'avvio dei lavori per la volta; cfr. PIRRI 1955, op. cit., p. 57.

²⁷³ Oltre al fratello Coculla appaiono Leonardo Milazzo, padre Giovan Battista Costarella, fratello Giuseppe Maiorano, padre Ludovico Flori (quest'ultimo legato alle vicende della seconda cupola) e padre Bernardino Lanfranchi; cfr. In RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 89.

²⁷⁴ A.S.Pa., *Case ex Gesuitiche*, v. H3, f. 397, agosto 1632.

²⁷⁵ In RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., pp. 91-93 il dettaglio sulle vicende costruttive della seconda cupola del Gesù, in particolare nel paragrafo 10.2 sono riportate alcune note sulle spese sostenute per la costruzione (p. 92). Di seguito la collocazione dei documenti citati dall'autrice nelle note 618-623; A.S.Pa., *Case ex Gesuitiche*, v. H5, ff. 46, 49v, 53v, 62, 66v, 72r.

²⁷⁶ NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 93.

²⁷⁷ Realizzata da Domenico Fontana tra il 1584 e il 1587 su incarico di papa Sisto V.

²⁷⁸ MALIGNAGGI 1987, pp. 187-202, in particolare p. 191 f. 12 e pp. 198-200 scheda n. 6; Diana Malignaggi intuisce che il documento è riferito alle vicende costruttive della cupola del Gesù, sbagliando tuttavia nella datazione proposta (1683). A Maria Clara Ruggieri Tricoli va il merito di aver riconosciuto il riferimento alla costruzione della seconda cupola del Gesù; cfr. RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 92.

²⁷⁹ VILLANI 2008 pp. 122-125.

²⁸⁰ In RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 100, vi è un rimando a «piogge torrenziali avvenute nell'aprile 1653», ma, come afferma la stessa autrice, ciò non esclude che la cupola del fratello Coculla sia potuta crollare anni prima o non sia stata ancora completata.

²⁸¹ A.S.Pa., *Case ex Gesuitiche*, v. "giornale" H11, ff. 153-165, per la cupola ff. 159-165, citato in RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 100 e p. 236, nota 717.

²⁸² A.S.Pa., *Fondo notai defunti*, notaio Crisostomo Barresi, vol. 1530, cc. 925r-926r, citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 114, p. 119 nota 3.

²⁸³ Le ipotesi sulla cupola sintetizzate nel seguito di questa trattazione sono delineate da Ciro D'Arpa; cfr. D'ARPA 2007, op. cit.

²⁸⁴ *Ivi*, p. 114; il termine *imbrici* indicherebbe anche le normali tegole per il deflusso delle acque; tuttavia, in questo caso, una definizione tanto precisa della commessa lascia intuire piuttosto un riferimento ai suddetti coronamenti per i torrioni.

²⁸⁵ AURIA [ed. 1870], p. 29.

²⁸⁶ Si apprende tale notizia da una lettera del 27 febbraio 1655; A.R.S.I., *Sic.* 16, II, c. 369v, lettera n. 35, documento citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 115 e p. 119 nota 6.

²⁸⁷ A.S.Pa., *Fondo notai defunti*, notaio Crisostomo Barresi, vol. 1567, cc. 215v-217r, citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 115, p. 119 nota 9.

²⁸⁸ Per una puntuale e dettagliata disamina dei documenti si veda D'ARPA 2007, op. cit.

²⁸⁹ In MANGANARO 1940, BRANDI 1966, p. 814, ma anche più recentemente in RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 100.

²⁹⁰ D'ARPA 1998.

²⁹¹ A. MONGITORE, *La cattedrale di Palermo*, ms. del secolo XVIII, *Biblioteca Comunale di Palermo* (B.C.P.), ai segni Qq. E. 3, cc. 152-153, trascrizione da D'ARPA 2007, op. cit., p. 119 nota 30.

²⁹² D'ARPA 2007, op. cit., p. 118.

²⁹³ A.R.S.I., *Sic.* 16, II, c. 476r, lettera n. 621, documento citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 116 e 119 nota 19.

²⁹⁴ NOBILE 2007, op. cit., pp. 262-263.

²⁹⁵ I lavori nella facciata di Trapani iniziano nel 1657; Marco Nobile chiarisce che «una veloce attribuzione dell'intero prospetto della chiesa gesuitica di Trapani non appare totalmente convincente, e si presenta solo leggermente più agevole per il secondo ordine», cfr. *Ibidem*.

²⁹⁶ Questa data è confermata da un pagamento di 2 onze e 18 tari in favore di Buonamici per l'incarico di Trapani; documento segnalato in SCANDARIATO 1988, pp. 50-54 e ripreso in BURGIO 2006, p. 27 nota 12, e in NOBILE 2007, op. cit., p. 263, p. 267 nota 17.

²⁹⁷ Per il documento in questione cfr. SCUDERI 1994, p. 18, p. 86 nota 33. L'informazione è riportata anche in AMATO 1728, p. 104.

²⁹⁸ A.R.S.I., *Sic.* 16, II, c. 423r, lettera n. 311, documento citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 115 e 119 nota 10.

²⁹⁹ A.R.S.I., *Sic.* 16, II, c. 438r, lettera n. 393, documento citato in D'ARPA 2007, op. cit., p. 115 e 119 nota 12.

³⁰⁰ B.n.F., Hd- 4, n. 110; V.R. 237, disponibile online all'indirizzo riportato in sitografia ref. [10].

³⁰¹ Si rammenti che il padre Bonici esprime preoccupazione per le vicende della cupola al padre Generale Nikel, che lo rassicura di aver già dato ordine al Provinciale di far eseguire quanto suggerito dall'architetto.

³⁰² AGUILERA 1740, op. cit., pp. 775-778.

³⁰³ BURGIO 2009, op. cit., p. 31.

³⁰⁴ BURGIO 2009, op. cit., p. 31; NOBILE 2012, [1], op. cit., p. 95.

³⁰⁵ SUTERA 2006, [2], pp. 73-79; SUTERA 2010, p. 291.

³⁰⁶ Si veda ancora il pagamento relativo all'incarico di Trapani citato in SCANDARIATO 1988, pp. 50-54; BURGIO 2006, p. 27 nota 12; NOBILE 2007, op. cit., p. 263, p. 267 nota 17.

³⁰⁷ D'ARPA 2007, op. cit.

³⁰⁸ A.S.Pa., *Case ex Gesuitiche*, v. H72, f. 38r, documento datato al 03.02.1669; edito in RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 114, p. 239 nota 818.

³⁰⁹ Il disegno è edito in CONSOLO, DE SETA, 1990, p. 180.

³¹⁰ D'ARPA 2007, op. cit., p. 117.

³¹¹ NOBILE 2007, op. cit., p. 264.

³¹² RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., pp. 99-100.

³¹³ Nel 1726 e nel 1751.

³¹⁴ G. B. AVILA, *Storia di Licata*, ms. del XVII secolo, *Biblioteca Comunale di Licata* (B.C.L.). L'attribuzione del manoscritto è rimasta per lungo tempo incerta; sulla prima pagina è riportato il nome di Giovanni Battista Avila; una nota successiva, trascritta da un bibliotecario a inizi Novecento, riporta il nome di Anton Maria Sèrrovira. La questione dell'attribuzione sembra essere stata risolta in favore di Avila, attraverso un controllo incrociato su un documento del 1654 custodito presso l'Archivio della confraternita di Sant'Angelo, che conferma il ruolo di deputato assunto da Avila in quegli anni. Il manoscritto è edito in DI NATALE 1998, p. 22, nota 11.

³¹⁵ La descrizione dell'antica chiesa è proposta in G. B. AVILA, ms. cit., ff. 274-275.

³¹⁶ *Ivi*, f. 275.

³¹⁷ *Archivio di Stato di Agrigento* (A.S.Ag.), notaio G. Murci, vol. 354, c. 231v.

³¹⁸ La lista del 1658 è custodita in A.S.Ag., notaio G. Scicolone, vol. 7845, cc. 500r-505r, e ripresa in D'ARPA 2000, op. cit., p. 40, pp. 47-48 nota 11.

³¹⁹ I pagamenti per la fornitura e la lavorazione di fusti e capitelli vengono effettuati solo nel maggio del 1651.

³²⁰ Per gli avanzamenti dei lavori e le relative tracce documentarie cfr. D'ARPA 2000, op. cit., pp. 47-49 note 11, 12, 15, 17.

³²¹ Vedi nota seguente.

³²² A.S.Ag., notaio L. Favara di Naro, vol. 5748, cc. 157r-158r, D'ARPA 2000, op. cit., p. 48 nota 14.

³²³ *Ivi*, p. 41.

³²⁴ A.S.Ag., notaio L. Favara di Naro, vol. 5748, cc. 157r-158r, *Ibidem*; gli altri esperti citati sono Gaspare Guercio architetto attivo nei principali cantieri di Palermo, Carlo D'Aprile scultore-architetto di Palermo, Giuseppe D'Amato capomastro del Regno e i frati Pietro da Genova e Marcello da Palermo; per una bibliografia cfr. *Ivi*, p. 48 nota 16.

³²⁵ Una prima attribuzione del progetto a Buonamici è in CARITÀ 1976, p. 52, successivamente anche in MELI, SCUTO 1977, p. 35.

³²⁶ NOBILE 2007, op. cit., p. 264.

³²⁷ A.S.Ag., notaio G. Scicolone, vol. 7845, cc. 500r-505r; cfr. D'ARPA 2000,

op. cit., p. 41; una prima attribuzione della sola facciata ad Angelo Italia è in CARBONELLI 1963, p. 37.

³²⁸ A.S.Ag., notaio G. Peleri, vol. 9813, cc. 485r-494r; cfr. D'ARPA 2000, op. cit., p. 41, p. 49 nota 20.

³²⁹ DI NATALE 1998, op. cit., p. 31.

³³⁰ G. B. AVILA, ms. cit., 274r-276v.

³³¹ Sintesi delle vicende del biennio 1662-1664 e relative fonti documentarie in D'ARPA 2000, op. cit., p. 49 nota 21.

³³² A.S.Ag., notaio G. B. G. Giaconia, vol. 13460, cc. 261r-275v, *Ibidem*, nota 22.

³³³ *Archivio Generale dei Carmelitani, Roma*, (A.G.C.R.), codex II, Sicilia (S. Angeli), 8, Conv. di Licata, *Relazione del 1680 per incarico del P. Gaspare Vaccarella O. C.*, cfr. SAGGI 1962, p. 287; DI NATALE 1998, op. cit., p. 32.

³³⁴ Un primo inquadramento sulla figura di Angelo Italia si trova in STELLA 1965; STELLA 1968; per i successivi approfondimenti e integrazioni cfr. VISCUSO 1978; COTRONEO CATANIA 1987 [ed. 1992], pp. 77-101; GIUFFRÈ 1992, pp. 147-154; NOBILE 1992, pp. 155-158; GRONERT 2006, pp. 51-60; sull'attività urbanistica legata alla ricostruzione del Val di Noto cfr. DUFUR, RAYMOND, 1987, pp. 11-34; l'attività di Angelo Italia nel cantiere del Sant'Angelo di Licata è documentata in D'ARPA 2000, op. cit., pp. 39-52; una sintesi dell'attività svolta all'interno della Compagnia di Gesù si trova in NOBILE 2012 [1], op. cit., pp. 91-139 e in dettaglio pp. 101-104.

³³⁵ SUTERA 2006, [1], pp. 190-191; secondo tale ipotesi, l'evidente somiglianza di alcuni elementi del portale di questa chiesa con quelli di chiese maltesi con attribuzione certa a Buonamici, potrebbe essere spiegata con un intervento dell'architetto lucchese, almeno in una prima fase progettuale; è noto che la costruzione della chiesa di Mazzarino sarà poi avviata anni più tardi grazie a un cospicuo lascito testamentario. Cfr. GAROFALO 2009, pp. 20-21.

³³⁶ NOBILE 2007, op. cit., p. 264; NOBILE 2012 [1], op. cit., p. 101. Il trasferimento di Italia a Mazzarino è documentato anche in GRONERT 2006, op. cit., p. 55.

³³⁷ F. E. CANGIAMILA, *Notizie della Matrice chiesa di Palma*, ms. del sec. XVIII, B.C.P., Qq. H. 1, n. 1.

³³⁸ Sulla formazione di Angelo Italia, Maria Giuffrè scrive che «L'origine artigiana, l'appartenere cioè a una famiglia di maestri muratori che dalla natia Licata si trasferì a Mazzarino, può costituire il veicolo informativo per l'acquisizione del "mestiere"; i Tomasi duchi di Palma e i Cafara Branciforte principi di Butera possono fungere da illuminati e colti committenti, interessati in prima persona sui fatti architettonici e

urbani sui quali si documentano nell'ambito delle proprie, immense biblioteche». GIUFFRÈ 1992, op. cit., p. 148; analoghe riflessioni in D'ARPA 2000, op. cit., p. 46.

³³⁹ A.R.S.I., vol. 70, f. 210.

³⁴⁰ NOBILE 2012 [1], op. cit., p. 101 nota 14.

³⁴¹ *Ivi*, p. 103; ad Angelo Italia era attribuita anche la chiesa gesuitica di Mazara (SCUDERI 1973, p. 31); più recente è l'attribuzione ad Andrea Pozzo; BÖSEL 2010, pp. 37-56. NOBILE 2012 [1], op. cit.

³⁴² SCUDERI, SCUDERI, 1995.

³⁴³ GAROFALO 2009, op. cit., p. 24.

³⁴⁴ VISCUSO 1978, op. cit.; GRONERT 2006, op. cit., p. 52.

³⁴⁵ NOBILE 1992, pp. 155-158, op. cit.; GRONERT 2006, op. cit., pp. 51-60.

³⁴⁶ DUFUR, RAYMOND, 1987, op. cit., pp. 11-34.

³⁴⁷ A.S.Ag., notaio G. B. G. Giaconia, vol. 278, cc. 142v-143v.

³⁴⁸ A.S.Ag., notaio G. V. Mortellitti, vol. 10401, cc. 717r-730r, in D'ARPA 2000, op. cit., p. 42, p. 50 nota 27.

³⁴⁹ A.R.S.I., voll. 36-37, f. 145; DUFUR, RAYMOND, 1987, op. cit., p. 28 nota 11; una prima attribuzione è in BOSCARINO 1981, p. 115.

³⁵⁰ Un pagamento del 16 luglio 1695 «al fratello Angelo d'Italia della compagnia di Gesù, illustre ingegniero per haversi fatto venire dalla città di Palermo in questa suddetta città» dovrebbe indicare l'arrivo a Licata dell'architetto.

³⁵¹ La chiesa è consacrata nel 1733; si apprende da alcune fonti che la cupola sarebbe parzialmente crollata nel 1847 e ricostruita nella configurazione attuale; cfr. CARITÀ 1988, p. 414.

³⁵² Si rammentino le prescrizioni di Messineo sulla costruzione della cupola, dovute alle cattive condizioni del terreno di fondazione.

³⁵³ «Il console genovese aveva la casa presso alla chiesa di San Lorenzo, la qual all'ora era la sua cappella: si come infin ora ne mostrano segno le croci della loro insegna, che sono rosse in campo bianco, dipinti in alcuni capitelli di travi, che il tetto vecchio sostengono, dove tuttavia quell'altra cappella pur loro di san Georgio ancora era, che ivi oggi si vede» PUGNATORE 1590, p. 79.

³⁵⁴ Una differente cronologia propone Benigno da Santa Caterina, autore di un prezioso manoscritto dell'Ottocento, che, rifacendosi a un'iscrizione di una lapide cinquecentesca posta sulla facciata, e in seguito trascritta anche in un transunto notarile del 1780, fa risalire la fondazione della chiesa al 1583. Cfr. BENIGNO DA SANTA CATERINA, *Trapani nello stato presente, profana e Sacra, opera divisa in due parti del padre Benigno da Santa*

Caterina agostiniano scalzo intitolata all'Arcangelo San Raffaele, ms. del 1812, *Biblioteca Fardelliana di Trapani* (B.F.Tp.), capo IV, parte II, vol. I, p. 173. La lapide in questione, oggi quasi completamente erosa dal tempo, riporta il seguente testo: «GREGORIO XIII PONTEFICE MAXIMO, PHILIPPO II REGE CATHOLICO, M. ANTONIO COLONNA VICEM EIUS HOC IN REGNO GERENTE, BERNARDO GASCO EPISCOPO MAZAR CURAE HUIUS AEDITUI EIUSDEMQUE CURIALES AMBO ANTONII EADEM AMBO NOCTE EDITI, AMBO CONSANGUINEI CARADONNA ALTER ALTER GUICCIARDUS COGNOMINATI EX INVICTISSIMAE URBIS HUIUS AERARIO CURIALIUMQUE NONNULORUM COLLATIONIBUS IMPERTITO SUMPTU ANGULUM HUNC A FUNDAMENTIS ERIGENDUM CURAVERAE SALUTIS ANNO MDLXXXIII SUB TEMPLI PROCURATORIBUS ANTONIO DE MONACO ET VINCENTIO DE SEPTEM SOLIDIS». Una trascrizione parziale dell'atto notarile che riproduce il testo della lapide è disponibile online in *Sitografia* ref. [11].

³⁵⁵ *Archivio di Stato di Trapani* (A.S.Tp.), notaio G. de Nuris, reg. 8567, cc. 151v-152, documento del 13.10.1421.

³⁵⁶ SERRAINO 1968, p. 296.

³⁵⁷ A.S.Tp., notaio G. Scanatello, reg. 8547, cc. 32v-33r, documento del 20 gennaio 1431. Cfr. PELLEGRINO 2011, pp. 661-678, in particolare p. 674.

³⁵⁸ «Nel 1603 i rettori della chiesa vennero autorizzati a vendere alcuni beni urbani per comprare le case di Vincenzo Galofaro, destinate ad essere demolite per la costruzione del nuovo cappellone (atto 29 aprile – not. Melchiorre Castiglione)»; cfr. SERRAINO 1968, op. cit., p. 296. E ancora in un volume del 1985 l'autore scrive: «Il secondo ingrandimento fu operato dai rettori della chiesa nel 1603, allorché venne incorporata la cappella di S. Giorgio e furono acquistati alcuni immobili e occupata una pubblica strada»; cfr. SERRAINO 1985, p. 113.

³⁵⁹ MONDELLO 1883, p. 33.

³⁶⁰ B. DA SANTA CATERINA, ms. cit., 1812, capo IV, parte II, vol. I, p. 173. Sulla figura di Bonaventura Certo si veda SCUDERI 1973, op. cit., p. 20. Un recente contributo sull'attività dell'architetto è in SUTERA 2011, pp. 355-367.

³⁶¹ SUTERA 2011, op. cit., pp. 360-361. Su un più ampio inquadramento del tema tra Cinquecento e Seicento si veda SUTERA 2014, pp. 40-52.

³⁶² SERRAINO 1968, op. cit., pp. 296-298.

³⁶³ RUGGIERI TRICOLI 2001, op. cit., p. 50.

³⁶⁴ Per una sintesi sulla poliedrica figura di Giovanni Biagio Amico si vedano: SCUDERI 1961; COTRONEO CATANIA 1985; CANGELOSI 1987; NOBILE 1995; NOBILE 2000; MAZZAMUTO 2003; op. cit., pp. 53-69.

³⁶⁵ Tra il 1708 e il 1712 progetta numerosi apparati effimeri: le *machine* per gli addobbi nella chiesa della Congregazione delle anime sante del Purgatorio in occasione della commemorazione dei morti (1708 e 1709); la *machina della Loggia* per il palazzo Senatorio di Trapani in occasione dei festeggiamenti del ferragosto (1710); la *machina per la novena reale* nella chiesa di Sant'Elisabetta (1711); la *machina* per le festività pasquali nella chiesa madre di Alcamo (1712). Nel 1720 progetta inoltre l'allestimento festivo dedicato al sovrano Carlo VI nella facciata del Collegio dei gesuiti di Palermo; cfr. SCUDERI, SCUDERI, 1995, op. cit., p. 47.

³⁶⁶ La prima opera di Amico, di certa attribuzione poiché annoverata nel curriculum professionale dell'architetto (AMICO 1750, pp. 151-152), sarebbe la Casa santa di Loreto nel Collegio gesuitico di Salemi, che Antonella Mazzamuto data al 1708; cfr. MAZZAMUTO 2003, op. cit., pp. 14-15 e pp. 65-66.

³⁶⁷ A.S.Tp., notaio M. Monaco, Bastardello 1710-1711.

³⁶⁸ MAZZAMUTO 2003, op. cit., pp. 68-71. Più in generale, per un resoconto delle opere dell'architetto, cfr. *Ivi*, *Schede filologiche*, p. 63-126.

³⁶⁹ Si riporta un elenco sintetico degli interventi di questo periodo, tratta dalla letteratura già citata: realizzazione della nuova chiesa di Santa Maria della Grotta a Marsala (1714); apparati decorativi nella cappella di Sant'Ignazio della chiesa del Collegio di Trapani (1714); ristrutturazione della chiesa della Badia Grande di Trapani (1716-1717); volta nella chiesa madre di Marsala (1717); costruzione della chiesa nel monastero di Santa Caterina a Calatafimi (1721-1734); chiesa di Sant'Oliva della Congregazione delle anime del Purgatorio di Alcamo (1723); chiesa della Badia Nuova nel monastero di San Francesco di Paola ad Alcamo (precedente il 1724).

³⁷⁰ AMICO 1726.

³⁷¹ A.S.Tp., notaio A. Di Blasi, minute 1725-1726, atto del 13.11.1725.

³⁷² A.S.Tp., Se, minute 1751-1752, n. 330, tto del 19.10.1751.

³⁷³ PALERMO, DI MARZO FERRO 1858, pp. 158-159 nota 2.

³⁷⁴ Amico scrive nella proposta di consolidamento per la cupola di San Pietro «Per quanto poi spetta a chiudersi le fessure fatte dalli continui movimenti, essendo ben compaginata, e ristretta La

Cupola dalli sud(dett)i quattro Lanternini, che à ben dirla faccion l'ufficio di Delfini facilissimamente si pratica con interpollargli alcune catene di Pietra ben soda fatte nella forma si veggiono espressate nella dietro Pianta lettera [4v.] I. e collocate nello spaccato interiore della Cupola, delle quali catene ne porto tutta la sperienza per averle à meraviglia provate nel riparare le grandi rovine accadute nella Città di Palermo pel Terremoto dell'anno 1726 delle quali mirabilmente se ne distingue l'unione dei Peli occasionali dalle fiere scosse del Terremoto in molte magnifiche fabbriche di Case, e Tempj di detta Capitale col'avvertenza però, che tali catene di pietra debbonsi ingastare nelle parti ove ritrovasi del sodo nel massiccio della Cupola, e non già nelle parti sfrantumate, mentre quello, che resta tra una catena, e l'altra si scaglierà bene con ingastarci Testette di Pietra ben beveronate di Gesso, o altra materia di presa secondo l'uso, e con ciò resterà già fatta in un sol corpo la volta, potendosi lo stesso praticare nello esteriore delle Cupole». Ms cit., B.A.V., *Cicognara*, V, 3849, in SCHLIMME 2006, op. cit., p. 61.

³⁷⁵ Il progetto è redatto alla fine del 1728 e nell'ottobre 1729 il campanile è già realizzato, come testimoniano due relazioni redatte dall'architetto alla fine dell'anno. A.S.Pa., notaio G. Magliocco, vol. 5223, c. 34, atto del 15.10.1729; *Ivi*, c. 156. Documenti trascritti in NEIL 1995, p. 362.

³⁷⁶ In quegli anni Amico fa realizzare il già citato modello ligneo per il controllo del profilo mistilineo della facciata; sul cantiere di Sant'Anna si vedano COMANDÈ 1948, pp. 7-9; LA BARBERA 1987, op. cit., pp. 99-108.

³⁷⁷ LA BARBERA 2006, pp. 255-274; PIAZZA 2012, pp. 51-67; per una più ampia e recente trattazione sulle vicende costruttive della chiesa di San Domenico a Palermo si veda l'intero volume VICARI 2012.

³⁷⁸ A. MONGITORE, *Memorie dei pittori, scultori, architetti, artefici in cera siciliani*, ms. della prima metà del XVIII sec., edizione a cura di NATOLI 1977, p. 98; il manoscritto e le vicende riportate sono citate e commentate in NOBILE 2000, op. cit., p. 53;

³⁷⁹ Il Regno di Sicilia, che dal 1720 è nelle mani del sovrano austriaco Carlo VI d'Asburgo, vive un momento di particolare tensione politica, che sfocerà, qualche anno più tardi, nel passaggio della corona dagli Asburgo d'Austria ai Borbone di Spagna; tra il 1733 e il 1734 l'esercito spagnolo intraprende la conquista dei territori dell'isola in nome di Carlo di Borbone, che viene incoronato re di Sicilia il 3 luglio 1735 a Palermo.

Amico, che sembra godere di un certo accreditamento presso le alte sfere austriache, sente forse la necessità di trasferirsi nella più tranquilla Trapani; cfr. NOBILE 2000, op. cit., pp. 53-69.

³⁸⁰ Questa lettura delle vicende professionali di Amico è proposta da Marco Nobile, che individua nel trasferimento a Napoli del viceré Portocarrero (1728) e nella scomparsa «di un illustre protettore come l'arcivescovo Gash» le possibili ragioni di questo trasferimento, forse accentuate anche da una «brutale o sempre più temibile concorrenza» nella professione; cfr. Nobile 2000, op. cit., pp. 53-54. Una differente interpretazione del «non salvevole» clima di Palermo che conduce Amico a Trapani, è forse riferibile alle sue precarie condizioni di salute, che lo spingono a scrivere un primo testamento già nel 1742; per questa ipotesi si veda MAZZAMUTO 2003, op. cit., pp. 16-17.

³⁸¹ Nel 1732, mentre dirige ancora il cantiere di San Domenico, è impegnato nella cattedrale per la costruzione del monumento funebre dell'arcivescovo Gash (MAZZAMUTO 2003, op. cit., p. 88) e nel progetto per la Biblioteca dei Benedettini di San Martino (DOTTO 2001, op. cit., pp. 49-53, 67-68.)

³⁸² A.S.Tp., notaio A. Di Blasi, minute 1729-1730, documento del 25.04.1730. Il titolo è fortemente voluto da Amico a seguito della morte del collega Giacomo di Stefano, come dimostrano le lettere che l'architetto invia al Tribunale del Real Patrimonio rivendicandone il titolo; cfr. A.S.Tp., Tribunale del Real Patrimonio, Memoriali, vol. 2480, 20.03.1730.

³⁸³ Ripara le fortezze di Palermo, Trapani, Licata, Favignana e Marettimo.

³⁸⁴ A.S.Tp., notaio G. Stabile, minute 1731-1732, documento del 31.10.1731.

³⁸⁵ A.S.Tp., notaio G. Stabile, minute 1732-1733, documento del 22.10.1732. Il 13 aprile 1733 Amico è sostituito da Giovanni Antonio Maurici nella carica di Architetto del Senato per incompatibilità con gli altri ruoli ricoperti.

³⁸⁶ «A proposito non è qui da sopirsi la tenera pietà, e devozione de' RR. Parochi della riferita Basilica Parochiale di S. Lorenzo; mentre il Rev. Abbate e Canonico Dottor D. Nicolò Mendieta uno di essi (...) acceso nel cuore da una santa invidia (emolando l'eroica generosità dell'altro Rev. Paroco di essa l'Abbate, e Dottor d. Giovanni d'Amico, Vicario attuale di questo Rev. Clero, il quale appena assonto al Parocato eresse dai fondamenti a man sinistra del Cappellone una nuova Cappella per collocarvi il perpetuo Divinissimo Sacramento) apri parimenti egli ed edificò ma a proprie spese alla man destra un'altra nuova cosimile Cappella dedicata in onore della

gran Vergine Maria di Trapani (...); GALIZIA 1733, pp. 42-43.

³⁸⁷ Per l'intera questione si rimanda ai ragionamenti di Marco Nobile; cfr. NOBILE 2000, op. cit., 53-69.

³⁸⁸ A.S.Tp., notaio G. Stabile, vol. 12095, cc. 294-295, documento dell'01.03.1734, trascritto da MAZZAMUTO 2003, op. cit., p. 137.

³⁸⁹ Con queste parole Amico esalta le qualità estetiche della soluzione a torrini angolari, proposta per il consolidamento della cupola di San Pietro: «Il maggior però di tutti i vantaggi sarebbe lo costituirsi la fabbrica in maggior magnificenza mentre i sudetti quattro Lanternini componerebbero un ben degno proporzionato ornamento alla celebre qualità della Fabbrica avendo mottivo la presente, e futura posterità di riguardare un novo Trionfo di gloriosa memoria nel sempre magnanimo Regnante Sommo Pontefice»; B.A.V., *Cicognara*, V, 3849, doc. cit., trascritto in SCHLIMME 2006, op. cit., pp. 59-61.

³⁹⁰ Il documento ci informa anche dell'esistenza di un *Campanile vecchio*, risalente agli interventi seicenteschi, da cui prelevare due campane, che andranno ricollocate nel nuovo campanile; quest'ultimo deve essere realizzato «incominciando dal sodo dell'ala di detta Chiesa»; A.S.Tp., notaio A. M. Monaco, vol. 12433, c. 515.

³⁹¹ Tuttora parzialmente visibile dentro il vestibolo progettato da Amico.

³⁹² Per le vicende costruttive della facciata, la ricostruzione del progetto e le questioni relative ai riferimenti formali adottati si rimanda al già citato contributo di Marco Nobile; NOBILE 2000, op. cit.

³⁹³ Intanto nel 1737 la chiesa diviene Collegiata, titolo che permette la disponibilità di nuovi fondi; tali fondi comunque non saranno sufficienti a finanziare l'intera campagna di lavori se nel 1743, quando la chiesa subisce ingenti danni a causa di un fulmine, è richiesto un impegno economico del vescovo di Mazara; nel 1844, infine, la chiesa diviene Cattedrale. Per il documento sulle riparazioni del 1743 cfr. A.S.Tp., notaio B. Renda, vol. 12677, c. 465, documento del 13.12.1743, citato in NOBILE 2000, op. cit., p. 73 nota 24.

³⁹⁴ A.S.Tp., notaio B. Renda, vol. 12677, cc. 941-942, documento del 09.08.1748, trascritto in NOBILE 2000, op. cit., 139-140.

³⁹⁵ NOBILE 2000, op. cit., pp. 62-65. Nel documento in questione, i contraenti si impegnano a realizzare «tutti l'intagli pulitamente fatti secondo l'immostra del pilastro incominciato sopra uno delli basamenti (...)». Nello stesso documento si fa cenno a un «modello fatto da d.o Ciantro Amico come Architetto»; è

plausibile che in questo caso si tratti di un disegno, poiché nel seguito del testo si precisa di «dover fare nel primo ordine tutti quelli intagli che ricerca l'architettura nell'ordine Dorico, quali non s'apprezzano nel modello per la piccolezza delle parti». A.S.Tp., notaio B. Renda, vol. 12677, cc. 941-942, documento del 09.08.1748.

³⁹⁶ AMICO 1750, op. cit., pp. 151-152.

³⁹⁷ Nel 1748 si commissionano le colonne libere da collocare sulla nuova facciata del Sant'Angelo, (A.S.Ag., notaio F. Carmona, vol. 16263, cc. 223r-226r, documento del 03.09.1748), che vengono regolarmente pagate alla consegna nel 1753 (A.S.Ag., notaio L. Aiala, vol. 17267, cc. 371v.-373v., documento del 12.02.1753); un anno prima si registra un pagamento di venticinque onze a *Don Giovanni Amico* (A.S.Tp., notaio O. Venza, vol. 12851, cc. 735r-v, documento del 02.08.1752, citato in MAZZAMUTO 1987, p. 131).

³⁹⁸ Sulla questione si vedano D'ARPA 2000, op. cit., p. 43, pp. 50-51 note 32-33, 35; MAZZAMUTO 2003, op. cit., pp. 125-126.

³⁹⁹ CONFORTI 1997 [1], p. 7.

⁴⁰⁰ VITRUVIO, *De Architectura*, libri I, II, III.

⁴⁰¹ MARCONI 1997, pp. 231-243 p. 231.

⁴⁰² Fontana, con l'intento di giustificare il proprio operato, richiama principi geometrici già esposti da Vitruvio e rivisti secondo le dotazioni tecnologiche dell'epoca; cfr. *Ibidem*.

⁴⁰³ Sull'intera questione si veda *Ivi*, pp. 231-243.

⁴⁰⁴ Nel noto inventario dei volumi compresi nella biblioteca di Amico è riportato un volume delle Architetture di Fontana; l'inventario è edito in NEIL 1995, op. cit.

⁴⁰⁵ AMICO 1750, op. cit., parte II, capi III-V; e in particolare tavole I-IV, pp. 28-34.

⁴⁰⁶ NOBILE 1995, p. 84.

⁴⁰⁷ AMICO 1750, op. cit., parte II, capo I, p. 17.

⁴⁰⁸ *Ivi*, parte II, capo III, p. 23.

⁴⁰⁹ AMICO 1726, op. cit., parte II, capo XVI, p. 61.

⁴¹⁰ *Ivi*, parte II, capo XVIII, p. 64.

⁴¹¹ AMICO 1750, parte I, capo VI, pp. 14-16 e relative figure 8, I-VI. Il metodo è riportato in gran parte della trattatistica.

⁴¹² Il procedimento prevede i seguenti passaggi: (a) si divida in tre parti l'arco AC; (b) si tracci la corda che congiunge il punto all'imposta con il suo adiacente sull'arco; (c) si riporti la dimensione della corda così determinata sul suo prolungamento, a partire dal punto d'imposta, sino ad intercettare il punto H; (d) la verticale tracciata su tale punto H determina lo spessore murario.

⁴¹³ Tra i più recenti ed esaustivi si cita MERINO DE CACERES 1994, pp. 9-52.

⁴¹⁴ LAMPÉREZ ROMEA 1930, op. cit., p. 185.

⁴¹⁵ RAMOS DE CASTRO 1982, op. cit.

⁴¹⁶ BERRIOCHOA 1986, op. cit.

⁴¹⁷ Cfr. Cap. 2.

⁴¹⁸ Le prese sono state eseguite con una fotocamera DSLR Canon Eos MarkII con sensore CMOS a pieno formato da 21.1 megapixel e ottiche distinte

⁴¹⁹ Figura assimilabile al nostro Responsabile Unico del Procedimento.

⁴²⁰ BERRIOCHOA 1986, op. cit., vol. III, op. cit.

⁴²¹ Omologo del nostro Assessorato Regionale ai Beni Culturali.

⁴²² I disegni delle chiese di Zamora e Toro sono stati gentilmente concessi dall'architetto Casaseca Beneitez al quale va la mia profonda gratitudine.

⁴²³ Almeno tre target visibili da due o più stazioni consecutive.

⁴²⁴ I rilievi sono stati gentilmente concessi dalla società Officina per le Arti Opera s.r.l., azienda fondata all'interno dell'incubatore di impresa ARCA dell'Università di Palermo.

⁴²⁵ *Codice Metrico-Siculo diviso in due parti*, Reale Stamperia, Palermo, 1835, pp. 10-11.

⁴²⁶ DOTTO 2001, p. 73.

⁴²⁷ *Ibidem*.

⁴²⁸ RAMOS DE CASTRO 1982, op. cit., pp. 27-31.

⁴²⁹ I raggi di curvatura delle costole interne variano tra 16 e 17 *pies*, determinando diametri compresi tra i 32 e i 34 *pies* complessivi; considerata la ricorrenza della dimensione di 32 *pies* nel progetto per l'intera fabbrica si ritiene che questa sia stata impiegata anche per definire il diametro della calotta.

⁴³⁰ Cfr. capitolo 6.

⁴³¹ Rettangolo in cui il rapporto tra i lati è uguale al rapporto tra il lato di un quadrato e la sua diagonale, tale rapporto si mantiene invariato dimezzando il rettangolo con una retta parallela ai lati minori. Questa proporzione permane anche ripetendo indefinitamente l'operazione.

⁴³² GARCÍA GUERETA 1922, op. cit., pp. 129-137.

⁴³³ BERRIOCHOA 2014, p. 14.

⁴³⁴ Bolla di Benito XIII del 10.05.1396; *A.C.S., cajón 15, legajo 2*, n. 11. Documento citato in BERRIOCHOA 1986, op. cit., p. 201.

⁴³⁵ A titolo esemplificativo si evidenziano discontinuità tra alcune delle colonne del primo e del secondo ordine o ancora differenze di diametro tra i fusti delle colonne.

⁴³⁶ Il disegno è edito in GARCÍA GUERETA 1922, op. cit., p. 134.

⁴³⁷ Tale setto murario funge da “piastra di scarico”, distribuendo i carichi provenienti dai costoloni sull’intera superficie del ringrosso.

⁴³⁸ Gli spessori murari medi della cupola di Salamanca sono maggiori rispetto a quelli della cupola di Zamora.

⁴³⁹ L’indagine sulle matrici geometriche della Collegiata di Toro è stata condotta integralmente sugli elaborati di rilievo prodotti dall’architetto Angel Casaseca Beneitez, che li ha gentilmente concessi per le finalità di questo studio.

⁴⁴⁰ Si noti che tale dimensione è la medesima impiegata per il dimensionamento dell’abside centrale di Salamanca; il criterio di dimensionamento delle due absidi è differente.

⁴⁴¹ A Zamora l’altezza dei pennacchi è pari ai $\frac{3}{4}$ del lato della crociera.

⁴⁴² Chi scrive è consapevole che il confronto è senz’altro anacronistico, ma al contempo, dalle indagini condotte, sembra di poter rintracciare inequivocabili parallelismi.

⁴⁴³ AMICO 1750, op. cit., parte II, capo V, pp. 25-58 e figg. 3-18.

⁴⁴⁴ *Ivi*, parte II, capo IV, p. 24.

⁴⁴⁵ Nel corpo basilicale è rilevabile una minima divergenza longitudinale, pari a un grado, tra l’asse passante per la crociera e l’abside, e l’omologo passante per la navata; tale divergenza, seppur irrilevante ai fini della nostra indagine, produce deviazioni pari all’1,09%.

⁴⁴⁶ AMICO 1750, op. cit., parte II, capo V, Tavola III, fig. 5, lettere AB.

⁴⁴⁷ Per la larghezza *Ivi*, tavola I, fig. 3, lettera A; tavola II, fig. 4, lettere I-I; per la lunghezza *Ivi*, tavola II, fig. 4, lettere AC;

⁴⁴⁸ *Ivi*, tavola III, fig. 5.

⁴⁴⁹ L’argomento sarà esposto più dettagliatamente nel seguito della trattazione.

⁴⁵⁰ A.S.Ag., notaio L. Favara di Naro, vol. 5748, cc. 157r-158r, doc. cit.; riportato in D’ARPA 2000, op. cit., p. 48 nota 14.

⁴⁵¹ *Ivi*, tavola II, fig. 4, lettere QQ; tavola III, fig. 5, lettere dd.

⁴⁵² L’altezza massima dell’arco è determinata dalla regola generale come somma tra l’altezza del primo ordine (4 moduli) e il diametro dell’arco (3,6 moduli). Questa regola prevede quindi l’impiego di un sovrassesto pari al raggio dell’arco (1,8 moduli); *Ivi*, tavola III, fig. 5, lettere DD.

⁴⁵³ *Ivi*, tavola II, fig. 4, lettera S.

⁴⁵⁴ *Ibidem*, lettera d.

⁴⁵⁵ *Ibidem*, lettera L.

⁴⁵⁶ *Ibidem*, lettera O.

⁴⁵⁷ *Ibidem*, lettera K.

⁴⁵⁸ Sono stati valutati gli scarti tra i lati del tamburo, da cui si evince che la dimensione media di ogni lato si attesta sui 376,5 centimetri, con variazioni massime di ± 5 centimetri. Tali scarti, se

rapportati all’intera dimensione dell’ottagono, inscrivibile in una circonferenza di circa dieci metri, sono pressoché trascurabili. Convertendo la dimensione del lato medio in canne si ottiene una misura di poco superiore a 14,5 palmi.

⁴⁵⁹ Rispetto alla formulazione della Canna Legale, la canna di Messina abolita (ante 1809) è pari a 1 canna, 0 palmi, 1 oncia, 2 linee, 2,64 punti, equivalente a circa 209,036 centimetri. Cfr. *Codice Metrico Siculo*, tavv. IV, VI.

⁴⁶⁰ Considerando un certo grado di approssimazione, dovuto alle tolleranze di cantiere e ai possibili adattamenti imposti dalle preesistenze.

⁴⁶¹ AMICO 1750, op. cit., parte II, capo III, p. 23.

⁴⁶² *Ivi*, p. 152.

⁴⁶³ *Ivi*, parte II, capo V, tavola II.

⁴⁶⁴ Si noti che gli archi minori e gli archi maggiori stanno in rapporto 1 a 2.

⁴⁶⁵ Si veda a mero titolo esemplificativo la cattedrale di Mazara, che presenta un sistema dotato di colonne binate in prossimità della crociera, o ancora a Trapani la chiesa del Collegio dei Gesuiti, la cui navata è sostenuta da un sistema di serliane.

⁴⁶⁶ Distanza tra il centro del poligono e il punto medio di uno dei suoi lati.

⁴⁶⁷ Le sezioni murarie del tamburo di Trapani sono di 116 (minima) e 162 (massima) centimetri circa; quelle di Licata si attestano su valori più contenuti, pari a 42 e 82 centimetri circa.

⁴⁶⁸ Lo scarto massimo è di circa 22 centimetri.

⁴⁶⁹ Cfr. paragrafo precedente.

⁴⁷⁰ SCATURRO 2005.

⁴⁷¹ Circolare Ministero Educazione Nazionale del 29 ottobre 1939, cfr. GALLI 1989, p.122.

⁴⁷² Soprintendente ai Monumenti fino al ’35 e affidatario della fiducia dei padri gesuiti nel processo di ricostruzione.

⁴⁷³ Ultimo accesso nel Luglio 2015.

⁴⁷⁴ Bobine 2662, 2680, 2681.

⁴⁷⁵ Le due immagini sono custodite presso l’archivio La Duca e edite in numerosi contributi; tra i più recenti cfr. TRICOLI 2001, op. cit., p. 162, p. 169; D’ARPA 2007, op. cit., p. 114, p. 117.

⁴⁷⁶ EASTMAN et al. 2008, op. cit., p. 99.

⁴⁷⁷ Cfr. paragrafo 3.2 e successivi.

⁴⁷⁸ Cfr. sitografia ref. [12].

⁴⁷⁹ FOWLER 1996; GERBINO, CROCETTA, DI MARTINO, 1997, pp. 423-434.

⁴⁸⁰ Lo standard maggiormente diffuso per lo scambio di dati tra software BIM è il protocollo IFC (Industry Foundation Classes).

⁴⁸¹ Ricercatore della Scuola di Ingegneria/Architettura dell’Università di Bologna e afferente al Laboratorio Silab

del Dipartimento di Architettura dell’università in epigrafe.

⁴⁸² Daniela Oreni, Raffaella Brumana, Stefano Della Torre, Fabrizio Banfi, Luigi Barazzetti, Mattia Previtali, del Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito del Politecnico di Milano. Sulla procedura sperimentata cfr. ORENI ET. AL. 2014, pp. 267-273.

⁴⁸³ GARAGNANI 2012, pp. 297-302; sitografia ref. [13].

⁴⁸⁴ I punti vengono decimati attraverso procedure automatiche, rese possibili grazie a un’applicazione correlata.

⁴⁸⁵ Sebbene questa procedura sia la più efficace tra quelle sinora sperimentate, non risolve il problema dell’interoperabilità tra i modelli digitali; ancora una volta il principale limite risiede nella capacità di attribuire ai solidi NURBS le connotazioni tipiche delle famiglie parametriche; per un approfondimento si rimanda al contributo ARRIGHETTI, BERTOLA, LIVIETTI, 2014. Si ringrazia la professoressa Daniela Oreni per i preziosi suggerimenti e per aver segnalato il suddetto contributo.

⁴⁸⁶ Durante uno studio condotto nel 2011 sono state indagate le procedure per l’estrazione semi-automatica da nuvole di punti di modelli per l’analisi strutturale; cfr. MANCONI et al. 2011, pp. 1475-1480.

⁴⁸⁷ Sitografia ref. [14].

⁴⁸⁸ A titolo esemplificativo non è stato possibile apportare modifiche ai singoli strati del pacchetto murario di un solido complesso.

⁴⁸⁹ Sitografia ref. [15].

⁴⁹⁰ *Abaqus 6.13 Theory Manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.

⁴⁹¹ I formati IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) e STEP (*STandard for the Exchange of Product model data*) SONO entrambi protocolli standard per il trasferimento di dati tridimensionali.

Bibliografia ragionata (ordine cronologico)

Testi sui temi metodologici

PLATONE, *Politico*, a cura di M. MIGLIORI, in: *Platone, Tutti gli scritti*, a cura di G. REALE, Bompiani, Milano 2000.

Codice Metrico-Siculo diviso in due parti, Reale Stamperia, Palermo, 1835.

A. C. QUATREMÈRE DE QUINCY, *Dictionnaire historique d'architecture, contenant dans son plan les notions historiques, descriptives, archéologiques, biographiques, théoriques, didactiques et pratiques de cet art*, II, 1832, edizione italiana *Dizionario storico di architettura contenente le nozioni storiche, descrittive, archeologiche, biografiche, teoriche, didattiche e pratiche di quest'arte di Quatremère de Quincy*, prima traduzione italiana di Antonio Mainardi riveduta, ordinata ed ampliata con giunte importantissime, Negretti, Mantova 1844, disponibile online su https://archive.org/details/bub_gb_ktXcW_Ry108C (ultimo accesso 2015.07.05).

E. PANOFSKY, *Die Perspektive als «symbolische Form»*, in «Vorträge der Bibliothek Warburg», 1927, edizione italiana *La prospettiva come forma simbolica*, Abscondita, Milano 2007.

A. KOYRÉ, *Du monde de l'«à-peu-près» à l'univers de la precision*, in «Etudes d'histoire de la pensée philosophique», Parigi 1961, edizione italiana *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino 1992.

U. ECO, *Proposte per una semiologia dell'architettura*, in «MarcaTrè», rivista di cultura contemporanea», Lerici editore, 34-35-36, 1967, pp. 58-81.

P. K. FEYERABEND, *Against method. Outline of an anarchistic theory of knowledge*, 1975, edizione italiana, *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*, IV ed., Feltrinelli, Milano 1981.

C. CRESTI, *Le Sante Marie del Fiore*, in «F.M.R. Mensile di Franco Maria Ricci», 9, 1982, pp. 55-73.

Enciclopedia Einaudi, 1977-1984, voll. 16, v. modello, IX 1982, pp. 383-422, 662-676.

V. GREGOTTI, *La geometria in funzione dell'architettura a grande scala*, in «La geometria in funzione», Quaderni del Dipartimento di Architettura e Progettazione Urbana, n. 10, IUAV, a cura di P. GRANDINETTI, Venezia, 1985.

W. J. F. SCHELLING, *Filosofia dell'arte*, Napoli, 1986.

L. GALLI, *Il restauro nell'opera di Gino Chierici (1877-1961)*, Milano 1989.

V. UGO, *Mimesi*, in *Temi e Codici del disegno d'architettura*, a cura di R. DE RUBERTIS, A. SOLETTI, V. UGO, Officina edizioni, Roma 1992, pp. 9-23.

G. SCATURRO, *Danni di guerra e restauro dei monumenti Palermo 1943-1955*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Conservazione dei Beni Architettonici, Università degli Studi di Napoli "Federico II" XVI ciclo, Napoli, 2005, disponibile online su http://www.fedoa.unina.it/540/1/SCATURRO-dottorato_2005.pdf (ultimo accesso 2015.07.05).

Testi sul rilievo e sulla rappresentazione

R. LIMING, *Practical analytical geometry with applications to aircraft*, Macmillan, 1944.

P. D. F. DE CASTELJAU, *Courbes et surfaces à pôles. Technical report*, A. Citroën, Paris, 1963.

J. KRAUTTER, S. PARIZOT, *Système d'aide à la définition et à l'usage des surfâces de carrosserie*, in «Journal de la SIA», 44, Special Issue: La commande numérique, a cura di P. Bézier, 1971, pp. 581-586.

R. O. DUDA, P. E. HART, *Use of the Hough Transformation to detect lines and curves in pictures*, in «Communication of Association for Computing Machinery», 15-1, 1972, pp. 11-15, disponibile online su <http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS474/Handouts/HoughTransformPaper.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11)

W. GORDON, R. RIESENFELD, *B-spline curves and surfaces*, in *Computer Aided Geometric Design*, a cura di R. E. Barnhill, R. F. Riesenfeld, Academic Press, 1974, pp. 95-126.

A. GRIMM, *Der Ursprung des Wortes Photogrammetrie [The Origin of the Term Photogrammetry]*, in «ISPRS Kongress», Hamburg 1980, pp. 53-60, disponibile online su <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/080Grimm.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).

D. H. BALLARD, *Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes*, in «Pattern Recognition», 13-2, 1981, pp. 111-122, disponibile online su <http://www.sci.utah.edu/~gerig/CS7960-S2010/handouts/Ballard-Generalized-HoughT.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).

R. A. JARVIS, *A perspective on range finding techniques for computer vision*, in «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 5, 1983, pp. 122-139.

P. D. F. DE CASTELJAU, *Formes à Pôles*, Hermès, Paris, 1985.

- R. PACCIANI, *I modelli lignei nella progettazione rinascimentale*, in «Rassegna», anno IX, 32, 1987, pp. 6-19.
- J. ILLINGWORTH, J. KITTLER, *A Survey of the Hough Transform*, in «Computer Vision, Graphics, and Image Processing», 44, 1988, pp. 87-116, disponibile online su http://www.researchgate.net/publication/n/223510596_A_survey_of_the_hough_transform/file/72e7e519c99c1dfe32.pdf (ultimo accesso 2014.11.11)
- G. PAGNANO, *Modulo e misura nell'ordine architettonico del chiostro dei Gesuiti*, in G. DATO, G. PAGNANO, *L'architettura dei Gesuiti a Catania*, Istituto Statale d'Arte, Milano 1991, pp. 99-107.
- P. J. BESL, N. D. MCKAY, *Method for registration of 3-D shapes*, in «Proceedings SPIE 1611, Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures», 586, 1992.
- Y. CHEN, G. MEDIONI, *Object Modelling by Registration of Multiple Range Images*, in «International Journal of Computer Vision and Image Understanding(IJCVU)», vol. 10, n. 3, pp. 145-155, 1992.
- M. DOCCI, D. MAESTRI, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari 1994.
- X. Y. JIANG, H. BUNKE, *Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping*, in «Machine Vision and Applications», 7, 1994, pp. 115-122, disponibile online su http://pdf.aminer.org/003/076/136/fast_segmentation_of_range_images_into_planar_regions_by_scan.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- W. SKARBK, A. KOSCHAN, *Colour image segmentation – a survey*, 1994, disponibile online su <http://iristown.engr.utk.edu/~koschan/paper/coseg.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11)
- A. STREILEIN, *Towards automation in architectural photogrammetry: CAD-based 3D- feature extraction*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 49 (5), 4- 15, 1994.
- Z. ZHANG, R. DERICHE, O. FAUGERAS, Q. LUONG, *A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry*, in «Artificial Intelligence», 78(1), 87-119, 1995.
- P. DEBEVEC, C. J. TAYLOR, J. MALIK, *Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach*, «Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques», pp. 11-20, 1996.
- J. FOWLER, *STEP for Data Management, Exchange and Sharing*, in «Technology Appraisals», UK, 1996.
- A. HOOVER, G. JEAN-BAPTISTE, X. JIANG, P. J. FLYNN, H. BUNKE, D. B. GOLDFOG, K. BOWYER, D. W. EGGERT, A. FITZGIBBON, R. B. FISHER, *An experimental comparison of range image segmentation algorithms*, in «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence» 18-7, 1996, pp. 673-689, disponibile online su <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/PAPERS/hover.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- M. DOCCI, R. MIGLIARI, *Disegno architettonico antico e medievale*, in *Storia del disegno*, a cura di G. DE FIORE, Utet, Torino 1997, pp. 23-32.
- S. GERBINO, S. CROCCETTA, C. DI MARTINO, *Data exchange in CAD systems: limits, solutions, perspectives*, in *Atti del X Convegno ADM, International Conference*, 17-19 Settembre 1997, Firenze 1997, pp. 423-434.
- F. A. VAN DEN HEUVEL, *3D reconstruction from a single image using geometric constraint*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 53 (6), 1998, pp. 354-368.
- R. ALBIERO, *Architettura e Misura, indagine sul concetto di misura in architettura*, Tesi del Dottorato di Ricerca in Progettazione Architettonica e Urbana, XI ciclo, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, Milano, 1999.
- C. BACIGALUPO, L. CESSARI, G. FANGI, *Rilievo, monitoraggio geometrico e rappresentazione di strutture a cupola*, in «Archeologia e Calcolatori», 11, atti del I workshop Nazionale di Archeologia Computazionale, Napoli-Firenze 1999, pp. 191-197.
- P. D. F. DE CASTELJAU, *Mon temps chez Citroën*, [edizione tradotta] *De Casteljau's autobiography: My time at Citroën*, in «Computer Aided Geometric Design - Special issue dedicated to Paul de Faget de Casteljau», 16(7), 1999, pp. 583-586, disponibile online su <http://www.davidsalomon.name/CGadvertis/deCasteljauArticle.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- H. POTTSMANN, J. WALLNER, *Approximation algorithms for developable surfaces*, in «Computer Aided Geometric Design», 16, 1999, pp. 539-556, disponibile online su <http://www.geometrie.tuwien.ac.at/ig/papers/pot099.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- L. PARIS, *Il problema inverso della prospettiva*, Roma 2000.
- H.-Y. SHUM, S. B. KANG, *A review of image-based rendering techniques*, in «Proceedings of IEEE/SPIE Visual

- Communications and Image Processing (VCIP)», 4067, Perth, Australia, 2000, pp. 2-13.
- J. ALBERTZ, *Albrecht Meydenbauer – Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage* in «Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001», Potsdam (Germany), September 18-21, 2001, p. 22.
- E. DOTTO, *La libreria di San Martino delle Scale: ridisegno degli interventi di G. B. Amico, G. Maggiordomo, G. V. Marvuglia*, Abadir, Palermo 2001.
- S. EL-HAKIM, *A flexible approach to 3D reconstruction from single images*, in «ACM Proceedings of SIGGRAPH '01», Los Angeles, California, 12th to 17th August 2001, pp. 186-193.
- S. EL-HAKIM, *Semi-automatic 3D reconstruction of occluded and unmarked surfaces from widely separated views*, in «Close Range Visualization Techniques», 2002.
- A. D. MARSHALL, G. LUKÁCS, R. MARTIN, *Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy*, in «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 23-3, 2001, pp. 304-314.
- O. AL KHALIL, P. GRUSSENMEYER, *Single image and topology approaches for modelling buildings*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 34 (5), Corfù, Grecia 2002, pp. 131– 136, disponibile online su http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/26/18/78/PDF/Alkhalil_grussenmeyer_2002_ISPRS_Corfù.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- J.-A. BERALDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, C. LATOUCHE, V. VALZANO, A. BANDIERA, *Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry*, in «Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording», Corfu, Grecia 2002, pp 65–72.
- G. FARIN, J. HOSCHEK, M. –S. KIM, *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Elsevier Science, Amsterdam, 2002, disponibile online su <http://books.google.it/books?isbn=0444511040> (ultimo accesso 2014.11.11).
- M. GAIANI et al., *Realtà virtuale come strumento di lavoro per il restauro architettonico e archeologico: il 3D Virtual GIS “La Via Appia antica”*, in *Ut Natura ars. Virtual Reality e archeologia*, atti della Giornata di Studi (Bologna, 22 aprile 2002), Università di Bologna, Imola 2002, pp. 107-113, disponibile online su <http://www.jiia.it> JIIA Eprints Repository <http://eprints.jiia.it/> (ultimo accesso 2014.11.11).
- L. ZHANG, G. DUGAS-PHOCION, J. S. SAMSON, S. M. SEITZ, *Single view modelling of free-form scenes*, in «Journal of Visualization and Computer Animation», 1, 2002, pp. 225–235.
- G. GUIDI, J.-A. BERALDIN, S. CIOFI, C. ATZENI, *Fusion of range camera and photogrammetry: a systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy*, in «IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics», 33(4), 2003, pp. 667–676.
- F. REMONDINO, A. RODITAKIS, *Human figure reconstruction and modelling from single image or monocular video sequences*, in «4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modelling (3DIM)», Banff, Canada, 6th to 10th October 2003, pp. 116-123.
- L. BORNAZ, *I sistemi a scansione laser*, in *La Tecnica del Laser Scanning Terrestre. Atti del convegno. Udine, 24-26 novembre 2004*, a cura di F. CROSILLA, S. DEQUAL, CISM, Udine 2004, pp. 1-24.
- D. AKCA, A. GRUN, *Least Squares 3D Surface Matching* in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 34 (5/WG16), 2004.
- D. G. Lowe, *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, in «International Journal of Computer Vision», 60(2), 91-110, 2004.
- G. VOSSELMAN, B.G.H. GORTE, G. SITHOLE, T. RABBANI, *Recognising structure in laser scanner point clouds*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 36, Freiburg, Germany, 2004, pp. 33-38, disponibile online su <http://www.isprs.org/proceedings/XX/XVI/8-W2/VOSSELMAN.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- R. MIGLIARI, *Disegno come modello. Riflessioni sul disegno nell'era dell'informatica*, a cura di R. Migliari, Kappa, Roma 2004.
- M. GAIANI, *Del disegno e del modello: rappresentazioni per il disegno industriale*, in *Disegno come modello. Riflessioni sul disegno nell'era dell'informatica*, a cura di R. MIGLIARI, Kappa, Roma 2004, pp. 45-56.
- R. MIGLIARI, *Per una teoria del rilievo architettonico*, in *Disegno come modello. Riflessioni sul disegno nell'era dell'informatica*, a cura di R. MIGLIARI, Kappa, Roma 2004, pp. 63-65.
- L. DE LUCA, P. VÉRON, M. FLORENZANO, *Semantic-based modelling and representation of patrimony buildings*, in «SVE Workshop towards Semantic Virtual

- Environments», Villars, Switzerland 2005.
- C. PANTOFARU, M. HEBERT, *A comparison of image segmentation algorithm*, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 2005, disponibile online su <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1335&context=robotics> (ultimo accesso 2014.11.11).
- T. RABBANI, F. VAN DEN HEUVEL, *Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 36, 2005, pp. 60-65, disponibile online su <http://www.isprs.org/proceedings/XXVI/3-W19/papers/060.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- N. SALA, M. SALA, *Geometrie del design. Forme e materiali per il progetto*, Franco Angeli, Milano, 2005.
- F. REMONDINO, S. EL-HAKIM, *Image-based 3D modelling: a review*, in «The Photogrammetric Record», 21 (115), 2006, pp. 269-291, disponibile online su https://www.researchgate.net/profile/Sabry_El-Hakim/publication/227786426_Image_based_3D_Modelling_A_Review/file/60b7d52b0bcd6e1eda.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- F. AGNELLO, M. LO BRUTTO, *Integrated surveying techniques in cultural heritage documentation*, in «International archives of the photogrammetry, remote Sensing and spatial information sciences», 36, 2007, pp. 47-52.
- P. DORNINGER, C. NOTHEGGER, *3D segmentation of unstructured point clouds for building modeling*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 35, 2007, pp. 191-196, disponibile online su http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1958.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- F. FASSI, *3D modeling of complex architecture integrating different techniques—a critical overview*, «3D-ARCH 2007 Proceedings: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures», ETH Zurich, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 5, 2007.
- A. GRÜN, F. REMONDINO, L. ZHANG, *Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afganistan*, in *The Photogrammetric Record*, 19(107), 2007, pp. 177-199, disponibile online su http://www.idb.arch.ethz.ch/files/04_ag-remondino_zhang_photogr.record.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- P. PATIAS, *Cultural heritage documentation*, in *Application of 3D Measurement from Images*, a cura di J. FRYER, H. MITCHELL, J. CHANDLER, ed. Whittles, Dunbeath, UK, 2007, 59, pp. 225-257.
- N. PFEIFER, C. BRIESE, *Geometric Aspect of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning*, in «Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007», Espoo, Finland, 12-14 September 2007, 36, Part 3/W52.
- Y. ARAYICI, *Towards building information modelling for existing structures*, in «Structural Survey», 26(3), 2008, pp. 210-222, disponibile online su http://usir.salford.ac.uk/11284/3/Towards_Building_Information_Modelling_for_Existing_Structure_For_Structural_Survey_Journal.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- C. EASTMAN, P. TEICHOLZ, R. SACKS, K. LISTON, *BIM Handbook. A Guide for Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (New Jersey, USA) 2008.
- A. LOPEZ, *La cúpula de El Escorial: geometría, estereotomía y estabilidad*, in *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Valencia 21 - 24 de octubre de 2009, a cura di S. Huerta, R. Marín, R. Soler, A. Zaragoza, Instituto Juan de Herrera, Madrid 2009, pp. 763-776.
- G. SANSONI, M. TREBESCHI, F. DOCCHIO, *State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation*, in «Sensors», 9, 2009, pp. 568-601
- Q. ZHAN, Y. LIANG, Y. XIAO, *Color-based segmentation of point clouds*, in *Laser scanning 2009*, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8, Parigi, 1-2 Settembre 2009, a cura di F. BRETAR, M. PIERROT-DESEILLIGNY, G. VOSSELMAN, Parigi, 2009.
- J. M. FRAHM et al., *Building Rome on a Cloudless Day*, in *11th European Conference on Computer Vision ECCV 2010*, Part IV, LNCS 6314, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, pp. 368-381, disponibile online su http://cs.unc.edu/~jmf/publications/Frahm_et_al_ReconstructionFromPhotoCollection.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- G. VOSSELMAN, H. G. MAAS, *Airborne and terrestrial laser scanning*, CRC, Boca Raton, 2010.
- S. AGARWAL et al., *Building Rome in a Day*, in "Communications of the ACM", 54(10), 2011 pp. 105-112.
- F. AGNELLO, *Le geometrie del progetto: il disegno di Giovanni*

- d'Avanzato e il rilievo della facciata di Santa Oliva, in I Quattro canti di Palermo. *Retorica e rappresentazione nella Sicilia del Seicento 1608-2008*, a cura di M. S. Di Fede, F. Scaduto, Caracol, Palermo 2011, pp. 87-106.
- C. BIANCHINI, *Rilievo, Modellazione e Studio Geometrico delle Cupole*, in *Le Cupole Murarie: Storia, Analisi, Intervento, PreProgetti*, Roma 2011, pp. 361-381.
- M. CANNELLA, *La Cappella palatina di Palermo misura interpretazione rappresentazione*, Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R 11/7/1980 - Ciclo XXII - Aprile 2011, Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Rappresentazione Dottorato di Ricerca in Scienze del Rilievo e della Rappresentazione - Settore disciplinare ICAR 17, Palermo 2011.
- L. COLOMBO, *Tecnologia e Tecnica nel Laser Scanning Terrestre. Annotazioni per i Beni Culturali*, in «Archeomatica», 3, Roma 2011, pp. 6-11, disponibile online su <http://www.mediageo.it/ojs/index.php/archeomatica/article/viewFile/81/73> (ultimo accesso 2014.11.11).
- L. DE LUCA, *La fotomodellazione architettonica Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Flaccovio, Palermo 2011.
- M. GAIANI, *Prefazione*, in L. DE LUCA, *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Flaccovio, Palermo 2011, pagine non numerate.
- I. GARCÍA, E. FERNANDEZ, A. MESANZA, *Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios*, in «Arqueología de la Arquitectura», 8, Madrid 2011, pp. 25-44.
- M. JUHA HYYPPÄ, *State of the Art in Laser Scanning* in «Photogrammetrische Woche», 53, Stuttgart 2011, pp. 203-216, disponibile online su <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/210/Hyyppa.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- F. REMONDINO, *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, in «Remote Sensing», 3, Bandung 2011, pp. 1104-1138, disponibile online su <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104> (ultimo accesso 2014.11.11).
- F. REMONDINO, A. RIZZI, B. JIMENEZ, G. AGUGIARO, G. BARATTI, R. DE AMICIS, [1] *the Etruscans in 3D: from Space to Underground*, in «Geoinformatics FCE CTU Journal», 6, Praga 2011, pp. 283-290, disponibile online su <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/117.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).
- F. REMONDINO, A. RIZZI, G. AGUGIARO, B. JIMENEZ, F. MENNA, F. NEX, G. BARATTI, [2] *Rilievi e Modellazione 3D*, in *Atti XV Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno, 2011.
- R. STAIGER, *10 years of terrestrial laser scanning - technology, systems and applications*, 2011, pp. 1-13, disponibile online su http://www.fig.net/news/news_2011/geosiberia_april_2011/Novosibirsk_Geosiberia_2011_Paper_Rudolf_Staiger.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- J. WANG, M. DONG, N. LU, *Study on the accuracy factors of large-scale photogrammetry system*, in «Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measuring Engineering», 79971, 2011.
- R. DE ROSSI, *Studio e applicazione della trasformata di Hough per il riconoscimento di target umani*, Tesi di Laurea della Facoltà di Ingegneria Meccanica e Meccatronica, Università degli Studi di Padova, relatore prof. A. Sona, a. a. 2011-2012, disponibile online su http://tesi.cab.unipd.it/39619/1/tesi_23_03_2012.pdf (ultimo accesso 2014.11.11).
- S. GARAGNANI, *Building Information Modeling semantico e rilievi ad alta risoluzione di siti appartenenti al Patrimonio Culturale Semantic Building Information Modeling and high definition surveys for Cultural Heritage sites*, in «Disegnarecon», rivista online, raccolta Geometria e costruzioni nella storia dell'Architettura, 9, 2012, pp. 297-302.
- F. M. GIAMMUSSO, *Surveying, Analysis and 3D Modeling in Archaeological Virtual Reconstruction: The Inner Colonnade of the Naos of Temple G of Selinunte*, in *Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*, 18th International Conference, atti del convegno, Milano 2012, pp. 57-63.
- G. NOVELLO, P. PIUMATTI, *La Geometria come filo di Arianna: note di approfondimento sul rapporto ideazione-costruzione della più grande cupola di forma ovata del mondo*, in «Disegnarecon» rivista online, raccolta Geometria e costruzioni nella storia dell'Architettura, 9, 2012, pp. 167-176, disponibile online su <http://www.disegnareconunibo.it> (ultimo accesso 2014.11.11).
- A. OSELLO, *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, Flaccovio, Palermo, 2012.
- A. CONTE, M. FILIPPA, (a cura di), *Patrimoni e Siti UNESCO. Memoria, Misura e Armonia*. Atti del XXXV Convegno Internazionale delle discipline della Rappresentazione, X Congresso UID, Matera 24-26 ottobre 2013, Gangemi, 2013.

N. HICHRI, C. STEFANI, L. DE LUCA, P. VERON, G. HAMON, *From point cloud to BIM: a survey of existing approaches*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-5/W2, 2013, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France, disponibile online su <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/STRASBOURG/ARCHIVES/isprsarchives-XL-5-W2-343-2013.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).

(L'Aquila), in «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Volume II-5, 2014, ISPRS Technical Commission V Symposium, 23–25 Giugno 2014, Riva del Garda 2014.

T. ABBATE, M. CANNELLA, *Matrici geometriche nelle absidi salentine del xvi secolo delle chiese di San Nicola a Cursi e di San Michele Arcangelo a Minervino di Lecce*, in *L'abside. Costruzione e geometrie*, a cura di M. R. NOBILE, D. SUTERA, Caracol, Palermo 2015, pp. 21-40.

G. GUIDI, M. RUSSO, D. ANGHELEDDU, *3D Survey and Virtual Reconstruction of archeological sites*, in «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 1-1, 2013, pp. 1-58, disponibile online su <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2014.01.001> (ultimo accesso 2014.09.10).

S. ARRIGHETTI, L. BERTOLA, A. LIVIETTI, *“Restituire” Collemaggio. Geometria, Materia, Modello. Rilievo e HBIM per il progetto di conservazione e il cantiere*, tesi di Laurea del Politecnico di Milano, Scuola di Architettura e società, relatore prof. R. BRUMANA, correlatore prof. S. DELLA TORRE, Milano 2014.

C. NICOLAE, E. NOCERINO, F. MENNA, F. REMONDINO, *Photogrammetry applied to problematic artefacts*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-5, 2014, pp. 451-456, disponibile online su <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5/451/2014/isprsarchives-XL-5-451-2014.pdf> (ultimo accesso 2014.11.11).

D. ORENI, R. BRUMANA, S. DELLA TORRE, F. BANFI, L. BARAZZETTI, M. PREVITALI, *Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake*

Testi generici sui temi storici

- A. MONGITORE, *La cattedrale di Palermo*, ms. del secolo XVIII, Biblioteca Comunale di Palermo, ai segni Qq. E. 3.
- A. MONGITORE, *Memorie dei pittori, scultori, architetti, artefici in cera siciliani*, ms. della prima metà del XVIII sec., edizione a cura di E. NATOLI, Palermo 1977.
- F. E. CANGIAMILA, *Notizie della Matrice chiesa di Palma*, ms. del sec. XVIII, Biblioteca Comunale di Palermo, Qq. H. 1, n. 1.
- G. M. AMATO, S. J., *De principe templo Panormitano*, Palermo 1728, disponibile online su <https://books.google.it> (ultimo accesso 2015.10.30).
- C. M. GALIZIA, *Brieve e solenne raguaglio delle solennità praticate nell'Invittissima e Fedelissima Città di Trapani in onore della Gran Regina del Paradiso la Gran Vergine Maria ...*, Trapani 1733, disponibile online su <https://books.google.it> (ultimo accesso 2015.10.30).
- E. AGUILERA, S. J., *Provinciae Siculae Societatis Jesu, ortus e res gestae, tomo I, (ab anno 1546 ad annum 1611)*, Felicella, Palermo 1740, disponibile online su <https://books.google.it> (ultimo accesso 2015.10.30).
- G. PALERMO, G. DI MARZO FERRO, *Guida Istruttiva per Palermo e suoi dintorni riprodotta su quella del Cav. D. Gaspare Palermo*, Tipografia Pensante, Palermo 1858, disponibile online su <https://books.google.it> (ultimo accesso 2015.10.30).
- G. E. DI BLASI, *Storia cronologica dei vicerè, luogotenenti e presidenti del Regno di Sicilia*, Stamperia Oreete, Palermo 1842.
- V. AURIA, *Diario delle cose occorse nella città di Palermo e nel regno di Sicilia dal di 8 gennaio del 1653 sino al 1674 del dottor D. Vincenzo Auria Palermitano*, in *Biblioteca Storica e Letteraria di Sicilia*, V, a cura di G. DI MARZO, Lauriel, Palermo 1870, disponibile online su <https://books.google.it> (ultimo accesso 2015.11.01).
- A. MANGANARO, *La chiesa di S. Francesco Saverio in Palermo ed il suo architetto*, tip. Greco, Palermo 1940.
- G. B. COMANDÈ, *Il prospetto della chiesa di S. Anna a Palermo e il suo architetto*, in «L'urbe», a XII (1948), n. 2, pp. 7-9.
- S. BOSCARINO, *L'architetto messinese Natale Masuccio*, in «Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura», 18, Facoltà di Architettura dell'Università di Roma, Roma 1956, pp. 8-19.
- C. NICOTRA, *Il Carmelo Palermitano*, Palermo 1960.
- P. PIRRI, S. J., G. Valeriano S. J., *architetto e pittore 1542-1596*, Institutum Historicum S. J., Roma 1970.
- S. BOSCARINO, *Sicilia barocca*, Roma 1981.
- S. LA BARBERA, *La facciata della Chiesa di S. Anna della Misericordia a Palermo*, in *Il Barocco in Sicilia tra conoscenza e conservazione*, a cura di M. FAGIOLO, L. TRIGILIA, Centro Internazionale di Studi sul Barocco in Sicilia, Ediprint, Siracusa 1987, pp. 99-108.
- D. SCANDARIATO, *Il Paliotto in corallo del Museo regionale «Pepoli» di Trapani ed alcuni manufatti di committenza gesuitica*, in «BCA Sicilia», 1-2, 1988-89, pp. 50-54.
- V. CONSOLO, C. DE SETA, *Sicilia teatro del Mondo*, Nuova ERI Edizioni RAI, Torino 1990.
- R. BÖSEL, *Tipologie e tradizioni architettoniche nell'edilizia della Compagnia di Gesù*, in *L'architettura della Compagnia di Gesù in Italia XVI-XVIII secolo*, atti del convegno, Milano 24-27 ottobre 1990, a cura di L. PATETTA, S. DELLA TORRE, Marietti, Genova 1992, pp. 13-26.
- D. LIGRESTI, *Terremoto e società in Sicilia (1501- 1800)*, Catania 1992.
- M. C. RUGGIERI TRICOLI, *Blandino Tommaso*, in L. SARULLO, *Dizionario degli artisti siciliani*, I, Architettura, a cura di M. C. RUGGIERI TRICOLI, Novecento, Palermo 1993, pp. 56-57.
- M. C. RUGGIERI TRICOLI, *Masuccio Natale*, in L. SARULLO, *Dizionario degli artisti siciliani*, I, Architettura, a cura di M. C. RUGGIERI TRICOLI, Novecento, Palermo 1993, pp. 295-297.
- E.H. Neil, *Architecture in Context: The Villas of Bagheria, Sicily*, tesi di Laurea della Harvard University, Department of Fine Arts, Cambridge 1995.
- V. SCUDERI, G. SCUDERI, *Dalla Domus Studiorum alla Biblioteca Centrale della Regione Siciliana. Il Collegio Massimo della Compagnia di Gesù a Palermo*, Palermo 1995.
- V. CATANIA, *Giovanni Biagio Amico architetto: la chiesa del Purgatorio a Trapani*, tesi di Laurea, relatore M. GIUFFRÈ, correlatore M. R. NOBILE, Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Palermo, a.a. 1995-1996.
- S. LA BARBERA, *La colonna dell'Immacolata di G. B. Amico nelle pagine della letteratura artistica palermitana dei secoli XVIII e XIX*, in *La Sicilia e l'Immacolata: non solo 150 anni*. Atti del convegno di studio, Palermo 1-4 dicembre 2004, a cura di D. CICCARELLI, M. D. VALENZA, Officina di studi medievali, Palermo 2006, pp. 255-274.

- D. SUTERA, *I progetti per la chiesa madre di Piazza Armerina e l'architetto Orazio Torriani: 1598-1628*, Tesi di dottorato di Ricerca in Storia dell'Architettura e Conservazione dei Beni Architettonici, Ciclo XVIII, tutors proff. M. R. NOBILE, R. BÖSEL, Università degli Studi di Palermo, 2006 [1].
- D. SUTERA, *Le relazioni di progetto e il modello di Francesco Battaglia per la cupola della Chiesa Madre di Piazza Armerina*, in «Lexicon. Storie e architettura in Sicilia», 3, 2006, p. 73-79 [2].
- M. VILLANI, *La più nobile parte. L'architettura delle cupole a Roma 1580-1670*, Gangemi, Roma 2008.
- M. R. NOBILE, *Progettare per la chiesa. Gli architetti, il lavoro, il disegno*, in *Ecclesia Triumphans. Architetture del Barocco siciliano attraverso i disegni di progetto. XVII-XVIII secolo*, catalogo della mostra, Caltanissetta, 10 dicembre 2009 – 10 gennaio 2010, a cura di M. R. NOBILE, S. RIZZO, D. SUTERA, Edizioni Caracol, Palermo 2009, pp. 15-24.
- M. R. BURGIO, *Disegni di fabbriche gesuitiche conservate presso la Bibliothèque Nationale de France*, in *Ecclesia Triumphans. Architetture del Barocco siciliano attraverso i disegni di progetto. XVII-XVIII secolo*, catalogo della mostra, Caltanissetta, 10 dicembre 2009 – 10 gennaio 2010, a cura di M. R. NOBILE, S. RIZZO, D. SUTERA, Edizioni Caracol, Palermo 2009, pp. 25-35.
- D. SUTERA, *Modelli e microarchitetture lignee*, in *Ecclesia Triumphans. Architetture del Barocco siciliano attraverso i disegni di progetto. XVII-XVIII secolo*, catalogo della mostra, Caltanissetta, 10 dicembre 2009 – 10 gennaio 2010, a cura di M. R. NOBILE, S. RIZZO, D. SUTERA, Edizioni Caracol, Palermo 2009, pp. 161-166.
- E. GAROFALO, *Mazzarino: la costruzione di una piccola capitale*, in *Percorsi di Archeologia e Storia dell'Arte*, a cura di S. RIZZO, Centro Culturale "Carlo Maria Carafa" Mazzarino, Paruzzo ed., Caltanissetta 2009, pp. 18-27.
- R. BÖSEL, *Retaggio e sperimentazione nella cultura architettonica di Andrea Pozzo*, in R. BÖSEL, L. SALVIUCCI INSOLERA, *Mirabili disinganni. Andrea Pozzo (Trento 1642-Vienna 1709). Pittore e architetto gesuita, mostra in occasione del III centenario della morte dell'artista*, Roma, Istituto Nazionale per la Grafica (5 marzo - 2 maggio 2010), Roma, Artemide, 2010, pp. 37-56.
- V. PELLEGRINO, *Trapani tardo medievale: un giro per i quartieri*, in *Memoria, storia e identità. Scritti per Laura Sciascia a cura di M. PACIFICO, M. A. RUSSO, D. SANTORO, P. SARDINA*, collana Quaderni. Mediterranea. Ricerche storiche 17, Associazione Mediterranea, Palermo 2011, pp. 661-678.
- S. PIAZZA, *Il cantiere nel Settecento*, in *La chiesa di San Domenico a Palermo. Quattro secoli di vicende costruttive*, a cura di N. VICARI, collana Conoscere e tutelare, 13, Fondazione Salvare Palermo, Palermo 2012, pp. 51-67.
- N. VICARI, *La chiesa di San Domenico a Palermo. Quattro secoli di vicende costruttive*, collana Conoscere e tutelare, 13, Fondazione Salvare Palermo, Palermo 2012.
- M. R. NOBILE, *Volte in pietra. Alcune riflessioni sulla stereotomia tra Italia meridionale e Mediterraneo in età moderna*, in *La stereotomia in Sicilia e nel Mediterraneo*, a cura di M. R. NOBILE, Palermo, Edizioni Caracol, Palermo 2013, pp. 30-36.
- D. SUTERA, *Catastrofi in Sicilia (XVI-XX secolo): repertorio bibliografico*, in *Catastrofi e dinamiche di inurbamento contemporaneo. Città nuove e contesto*, a cura di M. R. NOBILE, D. SUTERA, collana Storia e Progetto nell'Architettura, 1, Caracol, Palermo 2012, pp. 171-179.
- D. SUTERA, *Terremoti e monumenti in Sicilia: la facciata campanile tra*

- continuità, catastrofi e "ottimizzazioni" (XII-XVIII secolo), in *Aid Monuments. Conoscere Progettare Ricostruire*, a cura di C. CONFORTI, V. GUSELLA, Aracne Editrice, Roma 2013, pp. 390-399.
- D. SUTERA, *Chiese colonnari e tiranti metallici (Palermo XVI-XVII secolo)*, in «Lexicon. Storie e architettura in Sicilia», 18, 2014, p. 40-52.
- D. SUTERA, *The Bell-Tower Facade: An Aseismic Device in Sicily Between the 12th and 18th Centuries*, in «International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration», vol. 9, issue 2, 2015.
- Testi sui casi studio siciliani**
- G. F. PUGNATORE, *Historia di Trapani*, Trapani 1590, edizione a cura di S. COSTANZA, Società Trapanese per la Storia Patria, Corrao, Trapani 1984.
- G. B. AVILA, *Storia di Licata*, ms. del XVII secolo, Biblioteca Comunale di Licata.
- G. B. AMICO, *L'Architetto Pratico, in cui con facilità si danno le regole per apprendere l'Architettura Civile, opera dell'Abbate Dott. D. Giovanni Amico trapanese, Ingegniero del Regno di Sicilia per il Real Patrimonio, ed Architetto dell'Illustrissimo Senato della città di Trapani, libro primo*, Stamperia Gio. Battista Aicardo, Palermo 1726.
- G. B. AMICO, *L'Architetto Pratico, in cui con facilità si danno le regole per apprendere l'Architettura Civile, e Militare opera dell'Abate Dott. D. Giovanni Amico trapanese, Parroco, Rettore, Cianfro, e Prima Dignità dell'Insigne secolare Collegiata Parrocchiale del glorioso Martire S. Lorenzo nella città di Trapani, Architetto & c., libro secondo*, Stamperia Angelo Felicella, Palermo 1750.
- BENIGNO DA SANTA CATERINA, *Trapani nello stato presente, profana e Sacra opera divisa in due parti del padre Benigno da Santa Caterina agostiniano scalzo intitolata all'Arcangelo San Raffaele*, ms. del 1812, capo IV, parte II, vol. I, Biblioteca Fardelliana di Trapani.
- F. MONDELLO, *Breve guida artistica di Trapani*, Trapani 1883.
- G. FILITI S. J., *La Chiesa della Casa Professa della Compagnia di Gesù in Palermo. Notizie storiche, artistiche, religiose*, Bondi, Palermo 1906.
- P. PIRRI, S. I., *Giovanni Tristano e i primordi dell'architettura gesuitica*, Institutum Historicum S. J., Roma 1955.
- L. SAGGI, *S. Angelo di Sicilia: studi sulla vita, devozione, folklore*, Roma 1962.
- C. CARBONELLI, *Luci ed ombre su Licata*, Licata 1963.
- A. GIANNINO, S. I., *La Chiesa del Gesù a Casa Professa*, Palermo 1956, III edizione a cura di F. SALVO, S. I., Arti Grafiche Siciliane, Palermo 1986.
- J. VALLERY-RADOT, *Le recueil de plans d'édifices de la Compagnie de Jésus conservé a la Bibliothèque Nationale de Paris*, Institutum Historicum S. J., Roma 1960.
- V. SCUDERI, *L'opera architettonica di Giovan Biagio Amico (1648-1754)*, in «Palladio. Rivista di Storia dell'Architettura», 1-2, Istituto Poligrafico dello Stato, 1961, pp. 56-65.
- M. L. STELLA, *L'Architetto Angelo Italia*, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Lettere, relatore prof. C. Brandi, Palermo, Anno Accademico 1964-1965.
- C. BRANDI, *La cupola dello Juvarra a S. Andrea a Mantova e un precedente siciliano*, in *Arte in Europa. Scritti di storia dell'arte in onore di Edoardo Arslan*, 1, Milano 1966, p. 813-816.
- M. SERRAINO, *Trapani nella vita civile e religiosa. Compendio di notizie storiche alla luce degli atti notarili del XVI, XVII e XVIII secolo*, Cartograf, Trapani 1968.
- M. L. STELLA, *L'architetto Angelo Italia*, in «Palladio», 1-4, De Luca editore, Roma 1968.
- G. MACALUSO, *La Chiesa de Gesù a Casa Professa*, in «Ai nostri amici», giugno-agosto 1973, n. 5, pp. 113-120; n. 6, pp. 137-142; n. 7, pp. 163-174.
- V. SCUDERI, *Architettura e Architetti barocchi del trapanese*, Trapani 1973.
- C. CARITÀ, *I conventi di Licata nella storia e nell'arte*, Primavera edizioni, Licata 1976.
- M. SERRAINO, *Storia di Trapani*, voll. 3, II, Corrao, Trapani 1976, pp. 233-236.
- P. MELI, T. SCUTO, *Per una storia urbana di Licata: mostra fotografica "alla scoperta di Licata e della sua architettura"*, Canicatti 1977.
- T. VISCUSO, *Aspetti dell'Architettura Barocca in Sicilia: Guarino Guarini e Angelo Italia*, Assessorato Regionale ai Beni Culturali Ambientali e della Pubblica Istruzione - Soprintendenza ai Beni Artistici e storici della Sicilia Occidentale – Galleria Regionale della Sicilia, Palermo, 1978.
- N. AUCI, G. MESSINA, *Le Architetture di Giovanni Biagio Amico*, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, relatore: Prof. Arch. G. Susani, correlatore: A. MAZZAMUTO, Palermo, Anno Accademico 1984-1985.
- G. COTRONEO CATANIA, «L'Architetto Pratico» di Giovanni B. Amico nel contesto della cultura architettonica del '700 siciliano, in *Le Arti in Sicilia nel Settecento: studi in memoria di Maria Accascina*, a cura di M. GIUFFRÈ, M. LA MOTTA, Regione Siciliana, Assessorato dei Beni

- Culturali e Ambientali e della Pubblica Istruzione, Palermo 1985, pp. 37-48.
- M. SERRAINO, *Trapani invittissima e fedelissima. Storia civile e sacra. Arti e Patriziato. Riti e cerimonie della Settimana Santa*, Corrao, Trapani 1985.
- S. TOBRINER, *Angelo Italia and the Post-Earthquake Reconstruction of Avola in 1639*, in *Le Arti in Sicilia nel Settecento: studi in memoria di Maria Accascina*, a cura di M. Giuffrè, M. La Motta, Regione Siciliana, Assessorato dei Beni Culturali e Ambientali e della Pubblica Istruzione, Palermo 1985, pp. 73-86.
- A. CANGELOSI (a cura di), *Giovanni Biagio Amico (1684-1754): Teologo Architetto Trattatista, Atti delle giornate di studio, Trapani, 8-9-10 Marzo 1985*, collana «Storia, architettura, saggi», Multigrafica, Roma 1987.
- A. MAZZAMUTO, *Il progettare secondo «L'Architetto Pratico» e la pratica progettuale di Giovanni Biagio Amico*, in *Giovanni Biagio Amico (1684-1754): Teologo Architetto Trattatista, Atti delle giornate di studio, Trapani, 8-9-10 Marzo 1985*, collana «Storia, architettura, saggi», Multigrafica, Roma 1987, pp. 117-131.
- G. COTRONEO CATANIA, *Il primo barocco siciliano nel gesuita Angelo Italia*, in *Barocco Mediterraneo, Sicilia, Lecce, Sardegna, Spagna. Centri e periferie del Barocco*, atti del Corso Internazionale di Alta Cultura (Roma 22 ottobre-7 novembre 1987) a cura di M. L. MADONNA, L. TRIGILIA, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma 1992, pp. 77-101.
- L. DUFOUR, H. RAYMOND, *La riedificazione di Avila, Noto e Lentini. «Fra' Angelo Italia, mastro architetto»*, in *Il Barocco in Sicilia tra conoscenza e conservazione*, a cura di M. FAGIOLO, L. TRIGILIA, Centro Internazionale di Studi sul Barocco in Sicilia, Ediprint, Siracusa 1987, pp. 11-34.
- D. MALIGNAGGI, *Disegni nella Biblioteca Centrale della Regione Siciliana*, in *Il Barocco in Sicilia tra conoscenza e conservazione*, a cura di M. FAGIOLO, L. TRIGILIA, Centro Internazionale di Studi sul Barocco in Sicilia, Ediprint, Siracusa 1987, pp. 187-202.
- N. AUCI, *Le Architetture di Giovanni Biagio Amico*, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, relatore Prof. I. PINZELLO, correlatore A. MAZZAMUTO, Palermo, Anno Accademico 1987-1988.
- C. CARITÀ, *Alicata Dilecta*, Licata 1988.
- M. P. LO CICERO, *Angelo Italia e la tradizione dell'Architettura: la spazialità dell'Architettura Barocca e la Compagnia di Gesù in Sicilia*, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, relatore prof. Arch. A. SAMONÀ, correlatore Arch. G. LIUZZO, Palermo, Anno Accademico 1989-1990.
- M. GIUFFRÈ, *Angelo Italia architetto e la chiesa di San Francesco Saverio a Palermo*, in *L'architettura della Compagnia di Gesù in Italia XVI-XVIII secolo, Atti del convegno 24-27 Ottobre 1990*, a cura di L. PATETTA e S. DELLA TORRE, Marietti, Genova 1992, pp. 147-153.
- M. R. NOBILE, *Angelo Italia Architetto e la chiesa centrica con deambulatorio*, in *L'architettura della Compagnia di Gesù in Italia XVI-XVIII secolo, Atti del convegno 24-27 Ottobre 1992*, a cura di L. PATETTA e S. DELLA TORRE, Marietti, Genova 1992, pp. 155-158.
- D. DE LUCCA, C. THAKE, *The Genesis of Maltese Baroque Architecture: Francesco Buonamici*, Malta 1994.
- E. SCHICCHI, *La Chiesa del Gesù di Palermo: una fabbrica gesuitica tra Cinquecento e Seicento*, tesi di laurea, Facoltà di Architettura di Palermo, a. 1994-1995, relatore M. GIUFFRÈ, correlatore S. PIAZZA
- C. THAKE, *Francesco Buonamici (1569-1677). A pioneer of baroque architecture in Malta and Siracusa*, in *Annali del Barocco in Sicilia. Studi sul Seicento e Settecento in Sicilia e a Malta*, voll. 2, II, Gangemi, Siracusa 1995, pp. 15-29.
- M. R. NOBILE, *Giovanni Biagio Amico architetto: dal rilievo al tipo*, in *Annali del Barocco in Sicilia. Studi sul Seicento e Settecento in Sicilia e a Malta*, voll. 2, II, Gangemi, Siracusa 1995, pp. 83-87.
- A. LOMBARDO, *Tipo e Proporzioni: analisi grafica dei tipi ecclesiali del trattato di Amico*, Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, relatore prof. G. PAGNANO, Palermo, Anno Accademico 1996-1997.
- C. CONFORTI (a cura di), *Lo specchio del cielo, Forme significati tecniche e funzioni della cupola del Pantheon al Novecento*, Electa, Milano 1997 [1].
- C. CONFORTI, *Cupole, chiese a pianta centrale e culto mariano nel rinascimento italiano*, in *Lo specchio del cielo, Forme significati tecnici e funzioni della cupola del Pantheon al Novecento*, a cura di C. CONFORTI, Electa, Milano 1997, pp. 67-85 [2].
- N. MARCONI, *La teoria delle cupole nei trattati di architettura tra Seicento e Settecento*, in *Lo specchio del cielo, Forme significati tecnici e funzioni della cupola del Pantheon al Novecento*, a cura di C. CONFORTI, Electa, Milano 1997, pp. 231-243.

- M. COMO, *Un antico restauro statico della cupola di San Pietro a Roma*, in D. DE LUCCA, *Francesco Buonamici. Painter, Architect and Military Engineer in seventeenth century Malta and Italy*, International Institute for Baroque Studies, University of Malta, Malta 2006.
- G. DI NATALE, *La Chiesa di S. Angelo in Licata e Angelo Italia*, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, relatore prof. arch. N. MARSIGLIA, Palermo, Anno Accademico 1997-1998.
- C. D'ARPA, *La committenza dell'arcivescovo Martino de León y Cardenas per la Cattedrale di Palermo (1650-1655): un intervento inedito dell'architetto Cosimo Fanzago*, in «Palladio», 21, giugno 1998, pp. 35-46.
- C. D'ARPA, *Il contributo dell'architetto Angelo Italia al cantiere della chiesa di Sant'Angelo di Licata*, in «Lexicon. Storie e architettura in Sicilia», 0, 2000, p. 39-52.
- M. R. NOBILE, *I volti della "Sposa". Le facciate delle Chiese Madri nella Sicilia del Settecento*, Leopardi, Palermo, 2000.
- E. DOTTO, *La Libreria di San Martino delle scale, Ridisegno degli interventi di G. B. Amico. G. Maggiordomo. G.V. Marvuglia*, Abadir, San Martino delle Scale (PA) 2001.
- M. C. RUGGIERI TRICOLI, *Costruire Gerusalemme. Il complesso gesuitico della Casa Professa di Palermo dalla storia al museo*, Lybra, Pavia, 2001.
- E. FIDONE, *Problematiche progettuali e realizzative delle cupole*, in «Lexicon. Storie e architettura in Sicilia», 1, 2002, pp. 81-99.
- A. MAZZAMUTO, *Giovanni Biagio Amico: architetto e trattatista del Settecento*, Flaccovio, Palermo 2003.
- H. SCHLIMME, *Giovanni Amico commenta i danni della cupola di S. Pietro in Vaticano*, in «Lexicon. Storie e architettura in Sicilia», 3, 2006, pp. 57-61.
- C. D'ARPA, *Le cupole della chiesa di Casa Professa a Palermo. Precisazioni sulla terza e quarta cupola (1654-1656)*, in *Scritti in onore di Teresa Pugliatti*, a cura di G. BONGIOVANNI, DE LUCA, Roma 2007, pp. 114-119.
- M. R. NOBILE, *Francesco Buonamici e la Sicilia*, in *Architettura nella storia. Scritti in onore di Alfonso Gambardella*, a cura di G. CANTONE, L. MARCUCCI, E. MANZO, 1, Skira, Milano-Ginevra 2007, pp. 261-268.
- D. SUTERA, *La figura e l'attività di Bonaventura Certo, architetto dei francescani a Trapani nella prima metà del Seicento*, in *Francescanesimo e cultura nella provincia di Trapani*, Atti del convegno di studio, Trapani – Alcamo, 19-21 novembre 2009, a cura di D. Ciccarelli, Padova 2011, pp. 355-367.
- M. R. NOBILE, *Tecniche antisismiche nella Sicilia di età moderna*, in *Terremoti e ricostruzioni tra XVII e XVIII sec. Atti dei Seminari Internazionali* (Lisbona- Noto, 2008) a cura di M. GIUFFRÈ, S. PIAZZA, Palermo 2012, pp. 19-22. [2]
- M. R. NOBILE, *Catastrofi e ricostruzioni: il contributo della storia*, in *Catastrofi e dinamiche di inurbamento contemporaneo. Città nuove e contesto*, a cura di M. R. NOBILE, D. SUTERA, collana Storia e Progetto nell'Architettura, 1, Caracol, Palermo 2012. [3]
- S. PIAZZA, *Le cupole a torricini cilindrici: una soluzione antisismica nella Sicilia dei secoli XVII e XVIII*, in *Aid Monuments. Conoscere Progettare Ricostruire*, a cura di C. CONFORTI, V. GUSELLA, Aracne Editrice, Roma 2013, pp. 125-135.
- Testi sui casi studio di Castiglia**
- J. M. QUADRADO, F. J. PARCERISA, *Recuerdos y Bellezas de España*. Zamora, Madrid 1861, pp. 97-103, [ed. Valladolid 1990].
- M. VILLAR MACÍAS, *Historia de Salamanca*, Salamanca 1887.
- J. M. AVRIAL, *Catedral de Zamora*, in «Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando», 9, 1889, pp. 184-192, disponibile online su <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/consulta/registro.cmd?id=1039174>, (ultimo accesso 2015.10.15).
- P. DE MADRAZO, *Colegiata de Toro*, in «Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando», 109, 1891, pp. 302-309, disponibile online su <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/consulta/registro.cmd?id=1039174>, (ultimo accesso 2015.10.15).
- M. GÓMEZ MORENO MARTÍNEZ, *Inventario de la Catedral de Salamanca (año 1275)*, «Revista de Archivos, Bibliotecas y Museos», 3, época, año VI, luglio-settembre, 1902, pp. 175-180.
- M. GÓMEZ MORENO, *Catálogo monumental de España. Provincia de Salamanca (1901-1903)*, Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, Madrid 1927, voll 2.
- M. GÓMEZ MORENO, *Catálogo monumental de España. Provincia de*

- Zamora (1903-1905), Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, Madrid 1927, voll 2.
- R. GARCÍA GUERETA, *La Torre del Gallo*, in «Arquitectura», n. 36, 1922, p. 129-137.
- L. TORRES BALBÀS, *Los cimborrios de Zamora, Salamanca y Toro*, in «Arquitectura», n. 36, 1922, p. 137-153.
- J.L. MARTÍN JIMÉNEZ, *Reparación de la Torre del Gallo*, in «Arquitectura», 1923, p. 35-41.
- A. CUADRADO, *Templo Santa Maria la Mayor (Colegiata) de Toro*, Toro 1927.
- M. GÓMEZ MORENO, *El retablo de la Catedral Vieja de Salamanca*, in «Archivo Español de Arte y Arqueología», 10, Madrid 1928.
- V. LAMPÉREZ ROMEA, *Historia de la arquitectura cristiana española en la Edad Media según el estudio de los elementos y los monumentos*, ESPSA-CALPE, 1930.
- E. LAMBERT, *L'Art gothique en Espagne aux XII et XIII siècles*, Parigi 1931, in «Bulletin Hispanique», vol. 35, 1, 1933, pp. 70-76, disponible online su http://www.persee.fr/doc/hispa_0007-4640_1933_num_35_1_2572_t1_0070_0000_1 (ultimo accesso 2015.10.15).
- J. K. HERSEY, *The Salmantine lanterns: their origins and development*, Harvard University press, Cambridge 1937.
- E. TORMO Y MONZÓ, *Salamanca: las catedrales (sobre estudios inéditos de D. Manuel Gómez Moreno)*, Graficas marinas, Madrid 1930, pp. 40-41.
- J. GONZÁLEZ, *La Catedral Vieja de Salamanca y el probable autor de la Torre del Gallo*, in «Archivo Español del Arte», Consejo Superior de Investigaciones Científicas "Instituto Diego Velázquez", 55, Madrid 1943, pp. 39-50.
- J. GONZÁLEZ, *Alfonso IX*, Madrid 1944.
- F. CHUECA GOITIA, *La Catedral Nueva de Salamanca. Historia documental de su construcción*, Acta salmanticensia, in «Filosofía y Letras», tomo IV, n. 3, Universidad de Salamanca 1951.
- J. CAMÓN AZNAR, *Las etapas de la Catedral Vieja de Salamanca*, in «Goya: Revista de arte», 23, 1958, pp. 274-280.
- F. CHUECA GOITIA, *Historia de la Arquitectura Española. Edad Antigua y Edad Media*, voll. 2, I, Dossat, Madrid 1965.
- F. CHUECA GOITIA, *Historia de la Arquitectura Española. Edad Moderna y Contemporánea*, voll. 2, II, [Dossat, Madrid 1965], Fundación Cultural Santa Teresa, Ávila 2001, pp. 1-63, 343-369.
- A. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, *Los Churriguera*, Instituto Diego Velázquez, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid 1971.
- G. RAMOS DE CASTRO, *En torno a Fruchel*, in «Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología», voll 40-41, 1975, pp. 189-200.
- J. L. MARTÍN MARTÍN, L. M. VILLAR GARCÍA, F. M. RODRÍGUEZ, M. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, *Documentos de los Archivos Catedralicio y Diocesano de Salamanca (Siglos XII-XIII)*, Salamanca 1977.
- G. RAMOS DE CASTRO, *El arte románico en la provincia de Zamora*, Zamora 1977.
- H. PRADALIER, *La sculpture monumentale a la Catedral Vieja de Salamanca*, Tesi di Dottorato, Universite de Toulouse-Le Mirail, 1978.
- A. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, *Las Catedrales de Salamanca*, Everest, Madrid, 1978.
- G. RAMOS DE CASTRO, *La Catedral de Zamora*, Fundación Ramos de Castro para el estudio y promoción del hombre, Zamora 1982, pp.15-122.
- A. VIÑAYO GONZÁLEZ, *León y Asturias. Oviedo, León, Zamora y Salamanca*, in *La España Románica*, vol. 5, Encuentro, Madrid, 1987, pp. 303-406.
- V. NIETO, A. J. MORALES, F. CHECA, *Arquitectura del Renacimiento en España. 1488-1599*, Cátedra, Cátedra, Madrid 1989.
- I. G. BANGO TORVISO, *El Románico en España*, Espasa Calpe, Madrid 1992, pp. 9-42, 211-317.
- J. L. MARTÍN MARTÍN, *La construcción de la iglesia. La obra de la Catedral Nueva de Salamanca*, in *Salamanca y su proyección en el mundo. Estudios históricos en honor de D. Florencio Marcos*, a cura di J. A. Bonilla Hernández, Centro de Estudios Salmantinos, Salamanca, 1992, pp. 389-409.
- M. R. Y. PORTAL MONGE, *Sobre la construcción de Santa María de la Sede o Catedral Vieja de Salamanca: siglos XII-XIV*, in «Salamanca: revista de estudios», 29-30, Salamanca 1992, pp. 75-94.
- J. C. BRASAS EGIDO, *Catedral de Salamanca*, in *Las Catedrales de Castilla y León*, a cura di J. J. Rivera Blanco, B. Velado Graña, Edilesa, León 1992, pp. 145-166.
- A. CASASECA CASASECA, *Catedral de Zamora*, in *Las Catedrales de Castilla y León*, a cura di J. J. Rivera Blanco,

- B. Velado Graña, Edilesa, León 1992, pp. 205-221.
- A. CASASECA CASASECA, *Las Catedrales de Salamanca*, Edilesa, León 1993.
- A. CASTRO SANTAMARÍA, J. C. BRASAS EGIDO, *La Capilla Dorada*, in *Las Edades del Hombre. El contrapunto y su morada*, a cura di J. J. MARTÍN GONZÁLEZ, Salamanca, 1993, pp. 117-122.
- D. SÁNCHEZ Y SÁNCHEZ, *La Catedral Nueva de Salamanca*, collana «Catedrales, Santuarios y Ermitas de Salamanca», Salamanca 1993.
- J. M. MERINO DE CACERES, *Metrológia y simetría en las catedrales de Castilla y León*, in *Medievalismo y Neomedievalismo en la arquitectura española: Las Catedrales de Castilla y León*, I, atti del convegno (Ávila, Settembre 1992-1993), a cura di P. Navascués Palacio, J. L. Gutiérrez Robledo, Fundación Cultural Santa Teresa, Ávila, 1994, pp. 9-52.
- A. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, *Las Catedrales de Salamanca*, in *Medievalismo y Neomedievalismo en la arquitectura española: Las Catedrales de Castilla y León*, I, atti del convegno (Ávila, Settembre 1992-1993), a cura di P. Navascués Palacio, J. L. Gutiérrez Robledo, Fundación Cultural Santa Teresa, Ávila, 1994, pp. 147-160.
- J. GÓMEZ MARTÍNEZ, *Maestría versus destajo en la Catedral de Salamanca (1530-1535)*, in *Medievalismo y Neomedievalismo en la arquitectura española: Las Catedrales de Castilla y León*, I, atti del convegno (Ávila, Settembre 1992-1993), a cura di P. Navascués Palacio, J. L. Gutiérrez Robledo, Fundación Cultural Santa Teresa, Ávila, 1994, pp. 249-256.
- V. BERRIOCHOA SÁNCHEZ-MORENO, *La Catedral de Salamanca, trabajos de restauración*, in *Medievalismo y Neomedievalismo en la arquitectura española: Las Catedrales de Castilla y León*, I, atti del convegno (Ávila, Settembre 1992-1993), a cura di P. Navascués Palacio, J. L. Gutiérrez Robledo, Fundación Cultural Santa Teresa, Ávila, 1994, pp. 261-274.
- F. PEREDA ESPESO, *La catedral de Salamanca en la segunda mitad del siglo XVII*, in «Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología», 60, 1994, pp. 393-402.
- J. NAVARRO TALEGÓN, *La catedral de Zamora*, in *Aquellas blancas catedrales*, Valladolid 1996, pp. 92-93.
- A. RIESCO, *Un inventario de la catedral de Salamanca del siglo XIII*, in «Espacio, Tiempo y Forma», serie III, H. Medieval, tomo 9, 1996, pp. 277-302.
- M. N. RUPÉREZ ALMAJANO, *Aportaciones a la obra de Joaquín de Churriguera*, in «Boletín del Museo e Instituto Camón Aznar», 65, 1996, pp. 19-36.
- M. R. PORTAL MONGE, *Noticias documentales sobre las obras en Santa María de la Sede o Catedral Vieja de Salamanca durante los siglos XVI-XX*, in «Salamanca: revista de estudios», 39, Salamanca 1997, pp. 445-457.
- A. CASTRO SANTAMARÍA, *Canteros vascos en el Primer Renacimiento salmantino*, in «Ondare. Cuadernos de Artes Plásticas y Monumentales», 17, 1998, pp. 231-247, disponibile online su <http://www.euskomedia.org/PDFAnlt/arte/17/17231247.pdf> (ultimo accesso 2015.11.01).
- A. CASTRO SANTAMARÍA, *La "Prehistoria" de la Catedral Nueva de Salamanca*, in *Estudios Históricos salmantinos. Homenaje al P. Benigno Hernández Montes*, a cura di J. A. Bonilla, J. Barrientos, Salamanca 1999, pp. 113-128.
- M. R. Y. PORTAL MONGE, *Una traza de Churriguera*, in *Estudios Históricos salmantinos. Homenaje al P. Benigno Hernández Montes*, a cura di J. A. Bonilla, J. Barrientos, Salamanca 1999, pp. 169-178.
- J. A. RIVERA DE LAS HERAS, *La Catedral de Zamora*, Durus Cultural, Zamora 2001, pp. 15-62, versione digitale rivista e corretta disponibile online su http://www.romanicodigital.com/docu mentos_web/pdf/PDF'S_VISOR%20On-Line%20Abierto/ZAMORA/2-%20La%20catedral%20de%20Zamor a.swf, pp. 43-67 (ultimo accesso 2015.11.01).
- V. BERRIOCHOA SÁNCHEZ-MORENO, *La Catedral de Salamanca, su arquitectura*, in *IERONIMUS. 900 Años de Arte y de Historia, 1102-2002*, a cura di J. SÁNCHEZ VAQUERO, Salamanca 2002, pp. 29-51.
- A. CASTRO SANTAMARÍA, *La catedral de Salamanca bajo la maestría de Juan de Setién Güemes (1667-1703)*, in *Las Catedrales Españolas. Del Barroco a los Historicismos*, a cura di G. RAMALLO ASENSIO, Murcia 2003, pp. 467-489.
- J. A. LECANDA ESTEBAN, *Análisis Estratigráfico del cuerpo de torres de la Catedral Vieja de Salamanca*, in «Arqueología de la Arquitectura», 2, 2003, pp. 159-165.
- E. CARRERO SANTAMARÍA, *La Catedral Vieja de Salamanca. Vida y arquitectura en la Edad Media*, Colección «Seminario de Arte Medieval», 4, Nausicaä, Murcia 2004.
- J. NAVARRO TALEGÓN, *La Colegiata de Toro*, Junta de Castilla y León, Valladolid 2005.

M. CASAS HERNÁNDEZ, *Un proyecto de los Churriguera: el tabernáculo y el coro de la Catedral Nueva de Salamanca*, Tesi di Laurea della Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Salamanca, 2008, Relatore Dr. D. J. M. MARTÍNEZ FRÍAS, correlatore Dr. D. A. Casaseca Casaseca.

J. MARTÍNEZ DE AGUIRRE, *Investigación sobre arquitectos y talleres de construcción en la España medieval cristiana*, in «Anales de Historia del Arte», Volumen Extraordinario, 2009, pp. 127-163.

M. N. RUPÉREZ ALMAJANO, J. IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, *Las trazas de la Catedral Nueva de Salamanca de Andrés García de Quiñones conservadas en el Archivo Capitular del Pilar de Zaragoza y las intervenciones de los Churriguera*, in «Boletín del Museo e Instituto Camón Aznar», 105, 2010, pp. 355-397.

A. CASTRO SANTAMARÍA, *La Catedral como modelo: La catedral de Salamanca*, in *La catedral sin la catedral*, XVIII Edición del “Aula Hernán Ruiz”, atti del convegno (Siviglia 20-21 ottobre 2011) a cura di A. JIMÉNEZ MARTÍNEZ, Siviglia, 2011, pp. 57-115.

V. BERRIOCHOA, *Restauraciones arquitectónicas en la Catedral de Salamanca*, in *La Catedral de Salamanca, de fortis a magna*, a cura di M. CASAS HERNÁNDEZ, Salamanca 2014, pp. 1411-1500, versione consultata pp. 1-42.

AA.VV., *Catedral Vieja de Santa María de la Sede*, in *Enciclopedia del Románico en Castilla y León*, Fund. Santa Maria La Real. Centro de estudios del románico, 2015, pp. 225-287.

- Testi sui temi di matrice strutturale** alla fine del '700, in «bollettino ingegneri – Mensile di ingegneria e architettura», 10, 2013, pp. 3-14, disponibile online su <http://www.bollettinoingegneri.it/articoli/Ruggieri%20x%20web.pdf> (ultimo accesso 2015.11.01).
- M. SARGIN, *Stress-strain relationship for concrete and the analysis of structural concrete. Section. Study 4*, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1971.
- N. ARICÒ, O. MILELLA, *Riedificare contro la storia. Una ricostruzione illuminista nella periferia del regno borbonico*, Gangemi, Napoli 1984.
- N. RUGGIERI, R. ZINNO, *Analisi storica euristica del sistema antisismico Borbonico*, in *History of Engineering, Proceedings of the International Conference, Naples, 2014 May 19th - 20th*, a cura di S. D'AGOSTINO, G. FABRICATORE, vol. I, Cuzzolin editore, Napoli 2014, pp. 2-12.
- A. TOMMASELLI, *Risposta ciclica di pareti murarie portanti soggette a carichi ortogonali al piano medio: modellazione e sperimentazione*, Tesi di Dottorato, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- A. CHINN, *Why won't work?*, in «CAD User magazine», Luglio 2002.
- F. OTTONI, *La lunga vicenda delle fabbriche cupolate. Note storiche sulla stabilità, tra dibattito e sperimentazione*, Tesi di Dottorato del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università degli Studi di Parma, 2008.
- H. HIBBITT, B. KARLSSON, E. SORENSON, *ABAQUS Analysis User's Manual*. Pawtucket, Rhode Island, 2011.
- A. MANCONI, D. GIORDAN, P. ALLASIA, M. BALDO, G. LOLLINO, S. CERESINI, A. CAVAZZINI, *Integrazione di tecniche LiDAR e FEM per lo studio e l'analisi della stabilità dei pendii in frana*, in *Atti 15^a Conferenza Nazionale ASITA - Reggio di Colorno* 15-18 novembre 2011.
- Abaqus 6.13 Theory Manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.
- N. RUGGIERI, *Il sistema antisismico borbonico muratura con intelaiatura lignea. Genesi e sviluppo in Calabria*

Sitografia

- [1] <http://www.cyark.org>
- [2] <http://www.potree.org>
- [3] <http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/index.php>
- [4] <http://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-History.htm>
- [5] <http://www.arteguias.com/catedral/colegiatatoro.htm>
- [6] <http://www.romanocodigital.com>
- [7] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8448097z/f1.item.r=Collège%20de%20Palerme>
B.n.F., Hd-4, 114; V. R. n. 223
- [8] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8448062r.r=Église+du+Gesù+de+Palerme.langFR>
B.n.F., Hd- 4, 118; V. R., n. 224
- [9] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b84480650/f1.item.r=Église%20du%20Gesù%20de%20Palerme>
B.n.F., Hd-4, 119; V. R., n. 225
- [10] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8448099s/f1.item.r=coupe%20palerme>
B.n.F., Hd-4,110; V. R. n. 237
- [11] http://www.trapaniinvittissima.it/files/scudi_e_lapidi.pdf
- [12] <http://www.openbim.org>
- [13] <http://www.tcproject.net/pivotx/?p=greenspider>
- [14] <http://www.visualarq.com/it/>
- [15] http://www.cspfea.net/midas_fea.php

Indice delle abbreviazioni

- [1] A.C.S. Archivo de la Catedral de Salamanca.
- [2] A.C.Z. Archivo de la Catedral de Zamora.
- [3] A.G.C.R. Archivio Generale dei Carmelitani, Roma.
- [4] A.H.N. Archivo Hispánico Nacional.
- [5] A.R.S.I. Archivum Romanum Societatis Iesu.
- [6] A.S.Ag. Archivio di Stato di Agrigento.
- [7] A.S.Pa. Archivio di Stato di Palermo.
- [8] A.S.Tp. Archivio di Stato di Trapani.
- [9] B.A.V. Biblioteca Apostolica Vaticana.
- [10] B.C.L. Biblioteca Comunale di Licata.
- [11] B.C.P. Biblioteca Comunale di Palermo.
- [12] B.F.Tp. Biblioteca Fardelliana di Trapani.
- [13] B.H.R. Biblioteca Hertziana di Roma.
- [14] B.n.F. Bibliothèque nationale de France.
- [15] M.H.S.I. Monumenta Historica Societatis Iesu.